

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA



ISSN 0347-8165

UDK 556.3

624.1

## GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för:

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings- och avloppsteknik

**Reserapport från studieresa i USA samt  
deltagande i 2nd International Symposium  
on Land Subsidence i Anaheim, USA.**

**29 nov - 17 dec 1976**

**LEIF CARLSSON**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

## GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för:

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings- och avloppsteknik



ISSN 0347-8165

UDK 556.3

624.1

---

**Reserapport från studieresa i USA samt  
deltagande i 2nd International Symposium  
on Land Subsidence i Anaheim, USA.**

**29 nov - 17 dec 1976**

Adress:

Chalmers tekniska högskola

Geologiska institutionen

Fack

402 20 GÖTEBORG

**LEIF CARLSSON**



## Inledning

Med reseanslag från Statens råd för byggnadsforskning företog undertecknad en studieresa till USA kombinerad med deltagande i 2nd International Symposium on Land Subsidence in Anaheim.

Följande reserapport tar i kronologisk ordning upp besök, exkursioner och symposier under denna studieresa.

Tillsammans med Bengt Broms och Anders Fredriksson vid inst för jord- och bergmekanik vid Tekniska högskolan i Stockholm hade en uppsats inlämnats till Symposiet i Anaheim. Undertecknad presenterade uppsatsen vid Symposiet och fick tillfälle att samtidigt besvara frågor rörande marksättningsproblematiken i Sverige.

Göteborg den 15 juli 1977

Leif Carlsson

Måndag 29 november

Start från Torslanda i Göteborg. Flygresan över Atlanten tog 8 1/2 timmar. Byte i New York och ny flygresan till Denver som tog 4 timmar.

Tisdag 30 november

Besök vid US GEOLOGICAL SURVEY, Water Resources Division. Leonard Konikow stod för värdskapet.

Förmiddagen ägnades åt genomgång av programmet för veckan. Konikow presenterade övriga anställda på avdelningen. Under förmiddagen diskuterades numeriska modeller och Konikow behandlade också ett exempel från Sverige med dator för analys av grundvattenströmning och föroreningsspridning. Efter lunch samtal med James Taylor, som behandlade allmänt hur USGS var uppbyggd och speciellt Water resources division.

Amerika är indelat i 4 regioner beträffande Water resources division. Den västra regionen har Mental Park som centralort, den centrala regionen har Denver som centralort, nordöstra regionen Reston i Virginia och sydöstra har Atlanta som centralort. Reston är också centralort för hela Amerika där huvudkvarteret för Water resources division är beläget.

Tidigare var USGS uppdelad i grundvatten, ytvatten och kemisk avdelning men numera är man alltså uppdelad enligt ett helt annat system där en av avdelningarna utgör Water resources division. Inom regionerna finns olika distrikt, den västra har 8, centrala har 15, nordöstra har 15 och östra 9 distrikt. Distrikten motsvarar i stort sett staterna inom Amerika. Varje distrikt har ca 40-50 man anställda med en chef. Verksamheten inom distrikten är i huvudsak att samla in basdata inom ett observationsnät. Kontinuerligt insamlas vattenprov, vattenstånd registreras osv. Vattenprover analyseras vid resp centralort och

resultaten går på data tillbaka till distrikten samt lagras också på magnetband i Reston. Distrikten ägnar sig också åt viss undersökande verksamhet på uppdrag av olika kommuner och statliga institutioner. De regionala kontoren tar uppdrag som omfattar flera distrikt. I verksamheten inom Water resources division ingår förutom grundvatten också ytvattnet, dvs mätning av avrinning (hydrografer). Däremot ligger mätning av avdunstning på vädertjänsten. Inom de regionala avdelningarna finns speciella mindre avdelningar inriktade på hydrogeologisk forskning och utveckling. Leonard Konikow tillhör en av forskarna vid avdelningen i Denver och gruppens verksamhet sträcker utanför regionen och omfattar t ex modellbyggande och modelltänkande i hela Amerika.

Vid Water resources division pågick samtidigt med mitt besök en training course dit folk kallades in ifrån distrikten för att få specialutbildning inom vissa ämnesområden. Samtidigt inkallades specialister att hålla föredrag. Den tekniska utrustningen till dessa training courses var mycket avancerad, föredragen bandades med videobandspelare och bearbetades med text och stillbilder för att sedan distribueras ut till distrikten i en koncentrerad form. Ett detaljerat program för dessa training courses erhöles också och i dessa kurser kan även utlänningar få deltaga. Något att komma ihåg i framtiden.

Samtalen med James Taylor berörde också hur vattenproblemen hanteras på högre nivåer. I stort sett är det de enskilda staterna som bestämmer om vattnet. Federala myndigheter kan sätta upp vissa riktlinjer och vissa gränsvärden som inte skall överskridas. Det är dock staterna som ger tillstånd till utbyggnader, industrietableringar etc och sålunda bestämmer utvecklingen inom sitt eget område. Taylor berättade om en undersökning han hade deltagit i, i Missouri, norra

delen av Amerika där man hade identifierat olika akviferer, dels i de lösa avlagringarna, dels i kalkstenar och sandstenar och hade på så sätt gjort en vattenresursinventering. Taylor påstod vidare att det finns mycket mer grundvatten i Amerika än ytvatten och att man för tillfället hade en liten snedfördelning när det gäller utnyttjandet utav vatten. Grundvatten utnyttjades alldeles för litet. Han hade också skrivit en uppsats om detta och fått First price of the year article i Tidskriften Ground Water. I bilaga 1 redovisas hur olika vatten utnyttjas för olika ändamål i USA enligt en publikation av USGS.

#### Onsdag 1 december

Besök vid Water resources division, USGS

Diskussioner med regionalchef James Urwin (tillförordn), på regionalkontoret för centrala regionen. Han var också distriktschef för Oklahoma-distriktet.

Verksamheten inom distrikt resp regional region berördes under samtalen. Distrikten kan vara indelade i olika subdistrikt eller fältkvarter, exempelvis har man inom ett distrikt ca 4 st fältkvarter. I Oklahoma-distriktet finns 60 personer anställda, motsvarande antal för Texas-distriktet är 160 personer. Huvudparten av personalen tillhör teknikergruppen och de har ca 2 års collegeutbildning. Det är på distriktskontoren som de flesta arbetsuppgifter utförs. Regionalkontoret i Denver har ca 11 personer i något som kallas lednings- och operationsgrupp. De bestämmer policy och övervakar arbetena ute på distrikten. Till detta kommer researchgruppen vid regionalkontoret, ca 35-40 personer som är direkt underställda operationsgruppen.

Pengar för verksamheten vid Water resources division kan erhållas på 3 olika sätt, dels direkt från den



federala myndigheten (via US Geological survey), dels genom kooperativa program mellan staterna och federala organisationer, dels också som andra federala pengar t ex från EPA och liknande federala organisationer.

En del av de pengar som kommer från uppdrag skärs av och tillfaller regionalkontoret medan den största summan går ut till distrikten för arbetena på fältet. Resultat av uppdragsarbeten är beskrivning av rådande grundvattenförhållanden (även ytvattenförhållanden) samt förutsägelser vad som kan hända vid olika ingrepp eller olika alternativa åtgärder. Att bestämma vilken åtgärd eller liknande som är den bästa överlåter man till politiker och beslutsfattare i de olika staterna. Water resources division har föga möjligheter att följa upp vad som händer utförda uppdragsarbeten och bedöma huruvida en förutsägelse (prediction) slagit in eller ej.

Under eftermiddagen deltog jag i training course för distriktshydrologer, i avsnittet "Ground water recharge from hydrograph analysis". En mycket trevlig och intressant föreläsning där de olika möjligheterna att ifrån hydrografer plocka ut grundvattentillskott och grundvattenutflöde samt också studera inverkan av evapotranspiration från grundvattenmagasin. Föreläsningen avslutades med ett praktiskt exempel varvid en hydrograf under ett år analyserades.

#### Torsdag 2 december

Besök vid US GEOLOGICAL SURVEY, Water resources division.

Förmiddagen ägnades åt besök vid geofysiska avdelningen där Larry Mc Carrey stod för värdskapet. Han presenterade de olika log-metoderna som användes vid USGS för porositetsbestämningar. I stort sett användes 3 metoder nämligen neutron-neutronloggen, soniclog och gamma-gammalog.



Av dessa ger neutronloggen de högsta porositetsvärdena, sonicloggen ganska bra och med sanningen överensstämmande värden och gamma-gammaloggen ger högre värden än i verkligheten. Sonicloggen däremot arbetar inte så bra i okonsoliderade avlagringar där man får en väldigt dålig kontakt mellan de individuella kornen i avlagringarna. Här är det alltså bättre att använda neutronloggen eller gamma-gammaloggen.

Den neutronlog som har utvecklats vid USGS bygger på en mycket stark neutronkälla på några curie och är alltså inte alls samma ringa storleksordning som vår moistureprobe.

En annan mycket intressant probe som vi tittade på var den s k televiern. För närvarande finns den i 2 utföranden, båda är ca 12 fot långa men den mindre är endast 2 tum i diameter medan den större är 3 1/2 tum. De har använts och används för tillfället för att undersöka djupa akviferer med mycket varmt vatten och problemen har därför inkapslats med speciell kylanordning. Det är viktigt att proben centreras väl i borrhålen för att undvika missvisningar på grund av sneda reflektioner.

Med televiern kan man förändra utgående puls exempelvis mindre utbredd och skarpare och på så sätt få de olika sprickorna att framträda som större eller mindre svarta ytor på fotografiet. Nackdelen med televiering är att man kan inte komma förbi borrhålsväggen, dvs inte se sprickornas ev fortsättning i berggrunden.

En annan mycket intressant log var den s k spektrometerlogen där inte bara mängden gammastrålning analyserades utan också typ av gammastrålningen, exempelvis om den kom från plutonium eller uran eller från kalium etc. Sonden har visat sig mycket användbar i samband med spårning av läckage från deponering av radioaktivt

avfall. Två bussar eller truckar utnyttjades som transportmedel för all utrustning.

För sprickiga akviferer rekommenderades neutron-neutron-metoden och sonicmetoden samt televiern samtidigt. Också densitetsmätningar bör utnyttjas. Enligt Mc Carrey var dessa de bästa log-metoderna. Televier marknadsförs och försäljs av Simplic manufacturing Co, som har sitt huvudkvarter i Dallas, Texas. I Canada har elektromagnetisk logging i borrhål utvecklats analogt med den elektromagnetiska mätning som görs kartmässigt som från flygplan (jfr SGU:s RAMA-projekt). John Katsub på Canadas geologiska undersökning har utvecklat denna log-metod.

Eftermiddagen ägnades besök hos Daniel Leep och Burt Weip. Daniel Leep berättade om spårämneshörsök i samband med deponering av radioaktivt avfall. Hans fältområde var Nevada öken där amerikanerna håller på med underjordiska kärnexperiment. Hans uppgift var därvid att tala om vad det blev för föroreningar från experimenten och hur dessa föroreningar spred sig i olika akviferer. Som spårämne har han framför allt använt sig av tritium och svavel. Tekniken gick till så att vatten pumpades ur en brunn och injekterades i en annan brunn där man också hade en momentan injektion av spårämnet. Spårämnet registrerades därefter i pumpbrunnen. Mellan injektions- och pumpbrunn fanns observationsbrunnar i vilka kurvor med olika utseende på spårämniskoncentrationsförloppet registrerades. För tillfället bearbetade Leep data med en matematisk modell. Hela arbetet var uppbyggt på datainsamling medelst dataloggar och lagring på magnettejp av data för senare bearbetning i computer.

Burt Weir hade varit med om att utarbeta en rapport som hette "Geological and Hydrological considerations for various concepts of high-level radio-active waste-disposal in conterminous United States". En open file

report från 1974 som hade tagit reda på var någonstans i USA de bästa områdena för deponering av radioaktivt avfall fanns. Weir berättade att man utnyttjade bl a slug-bailer test och stegpumpningar för bedömning av akviferens täthet. Det gällde att utnyttja de befintliga borrhål då det kostade mycket att borra hål för att undersöka akviferer på djupet. Enhållsförsök var därför att föredra. Ett exemplar av rapporten erhöles. Weir berättade också att de bästa ställerna för radioaktiv deponering är saltdomer där en självläckning av sprickor förekommer och där samtidigt inget grundvatten förekommer. Andra bra bergarter skulle kunna vara skiffrar som också kan vara självtätande när det gäller spricksystem. I kristallina bergarter har vissa försök gjorts speciellt att kapsla in det radioaktiva avfallet i granitstockar.

Vidare ägnades eftermiddagen åt besök och samtal med Richard Blankennagel. Han hade undersökt och håller på att undersöka en akvifer i staterna norr om Colorado. Akviferen är ganska djup och går under benämningen Medicine-akviferern. Anledningen till undersökningen är exploatering av kol. Vatten behövs antingen för industrier som tar vara på kolet på platsen eller till den kolslurry som skall transporteras med pipe line till annan plats för utnyttjande. Man befärar att stora vattenuttag skall åstadkomma en allvarlig försämring av vattentillgången inom området och därför har man satt igång denna undersökning där bl a Donald Brown var inkopplad i samband med televiewer-undersökningar. Vid diskussioner om grundvattenbassänger jämfördes grundvattenbassänger i Sverige, dess utnyttjande etc med bassängerna i USA. I Medicine-bassängen förekom grundvatten på stort djup men det hade sådant tryck att det steg upp över markytan. Vattnet var varmt till botten, på ca 3.000 fots djup 49<sup>o</sup> och man befärade upp till 80<sup>o</sup> nere på 5.000 fots djup dit man nu borrhade i ett andra borrh-

hål. I detta borrhål skulle den tidigare nämnda televeiwern med kylning testas. Av planläggningen för arbetet framgick att detta förväntades pågå i ytterligare 5 år. I ett inledande skede hade en numerisk modell upprättats över akviferen. Fortfarande var djupet till den underlagrande prekambiska berggrunden okänd. En annan intressant uppgift var att man i sådana här undersökningar försökte att utnyttja borrhålen så mycket som möjligt, dvs man applicerade slug-bailer test, stegpumpningar etc i de individuella borrhålen på olika djup.

#### Fredag 3 december

Förmiddagen ägnades åt besök hos Blankennagel. Olika borrhålsundersökningar, hydrauliska undersökningar såsom swabbing, slugging och bailing diskuterades. En metod som Blankennagel var förtjust i var drillsteam-test, dvs den s k T-testen. Den tillgår på så sätt att man studerar hur ett uppbyggt tryck i ett borrhål avlastas. Metoden är beskriven i diverse handböcker. Olika packers diskuterades och broschyrer insamlades. Vidare erhöles litteratur rörande slug-test etc.

Eftermiddagen ägnades åt utflykt upp till Loveland i Klippiga bergen. Snötillgången var förvånansvärt god och programmet omfattade bl a skidåkning.

#### Måndag 6 december

Flyg från Denver till San Francisco. Flög över Klippiga bergen, Nevadaöknen och Sierra Nevada till San Francisco. Massarsch, BFR-stipendiat från KTH, guidade runt på Berkeley University, Dept of Civil Engineering.

#### Tisdag 7 december

Ägnade dagen åt en utfärd med Massarsch till San Francisco samt besökte i Lawrence Hall ovanför Berkeley. Där visades i utställningsform de aktiviteter som bedrivs eller bedrivits vid universitetet i Berkeley.

Onsdag 8 december

Besökte Richmondlaboratoriet där Berkeley Universitetets fältstationer var belägna. Studerade triaxialförsök på berg där inverkan av sprickighet undersöktes.

Eftermiddagen ägnades besök på inst för jordmekanik.

Torsdag 9 december

Deltog i AGU:s höstmöte i San Francisco. American Geophysical Union ordnar under varje år vår- och höstmötet. Mellan den sjätte och tionde december hölls på hotell Jack Tar och Holliday Inn 1976-års höstmöte. Mötet var indelat, liksom hela AGU, i följande sektioner:

- Union (U)
- Geodesy (G)
- Geomagnetism and Paleomagnetism (GP)
- Hydrology (H)
- Meteorology (M)
- Oceanography (O)
- Planetology (P)
- Seismology (S)
- Solar - Planetary Relationships: General (SP)
- Solar - Planetary Relationships: Aeronomy (SA)
- Solar - Planetary Relationships: Cosmic Rays (SC)
- Solar - Planetary Relationships: Magnetospheric  
Physics (SM)
- Solar - Planetary Relationships: Solar and Inter-  
planetary Pysics  
(SS)
- Tectonophysics (T)
- Volcanology, Geochemistry and Petrology (V)

Den hydrologiska sektionen hade följande program:

**Soil Water and Groundwater (H1-H10)**

Redwood (HI), Monday 0830h

G. Meyer (U.S. Geological Survey), Presiding

J. V. Giraldez, G. Sposito: Some Aspects of the Drainage of Saturated Swelling Soils (H1), Withdrawn.

Vijay K. Gupta, Garrison Sposito, R. N. Bhattacharya: Some Rigorous Results in the Theory of Water Flow Through Inhomogeneous Porous Media (H2), 0930h

R. William Nelson, Patrick G. Easley: Calculated and Observed Nonisothermal Multiphase Flow Results in Vertical Columns (H3), 0945h

I. Bogardi, L. Duckstein: A Stochastic Model of Groundwater Level Exceedances (H4), 1000h

P. Kitanidis, R. L. Lenton, J. L. Wilson: A Unified Approach to the Parameter Estimation of Groundwater Models (H5), 1015h

C. H. Amick, J. E. Gale, P. A. Witherspoon: Observations on Stress-Dependent Fracture Permeability Using Large Diameter Granite Core (H6), 1030h

D. R. Kassoy: The Flow of Hot Water in a Fault Zone (H7), 1045h

C. C. Reeves, Jr.: The Ogallala Aquifer, West Texas: Geologic Problems Concerning Artificial Recharge (H8), 1100h

N. Krishnamurthi: A Comparison of Dewatering With Discharging in an Underground Mine (H9), 1115h

Walter W. Loo: A Practical Method on the Determination of Well Spacing (H10), 1130h

**Water Quality (H11-H22)**

Redwood (HI), Monday 1330h

T. D. Steele (U.S. Geological Survey), Presiding

G. B. Matanga, M. A. Marino: Achieving Optimum Salt Levels and Plant Growth With a Limited Water Supply (H11), 1330h

M. Th. van Genuchten, G. F. Pinder: Material Transport Under Transient Saturated-Unsaturated Conditions (H12), 1345h

T. N. Narasimhan, John A. Cherry, Don L. Bingham, Paul A. Witherspoon: Interpretation of Water Quality Data From Observation Wells in Stratified Aquifers (H13), 1400h

V. LeFebvre: Chemical Relaxation in a Limestone Aquifer (H14), 1415h

D. S. Bowles, W. J. Grenney: Steady State River Quality Modeling by Sequential Extended Kalman Filters (H15), 1430h

L. Duckstein, I. Bogardi, M. Fogel: Uncertainty of Phosphorus Input Into a Lake (H16), 1445h

Break 1500h

William L. Morse: The Dishonest Method in Stream Temperature Modeling (H17), 1530h

J. A. Westphal: The Exponential Relation Between Dissolved Solids and Flow Rate Reconsidered (H18), 1545h

Michael P. Barkdoll, Donald E. Overton, Roger P. Betson: Some Effects of Dustfall on Urban Stormwater Quality (H19), 1600h

S. L. Ponce, R. H. Hawkins: Prediction of Salt Pickup by Overland Flow in the Upper Colorado River Basin (H20), 1615h

A. D. Parr: Once-Through Power Plant Cooling: Why Not? (H21), 1630h

A. B. Gureghian, R. W. Cleary: Three-Dimensional Groundwater Pollution Modeling (H22), 1645h

**Estuarine and Nearshore Physical Processes I (O35-O46, H, M)**

California (HI), Monday 1330h

D. M. Conlon (Office of Naval Research), Presiding

R. Walton: Pollution Transport in Canal Networks With Small Tidal Ranges Using a Characteristic Finite Difference Technique (O35), 1330h

Jeffery C. Rogers: Climate, Ice, and Summertime Navigability of the Beaufort Sea (O36), 1345h

G. A. Cannon, N. P. Laird: Wind Effects on Tidally Averaged Current Profiles in a Fjord Estuary (O37), 1400h

J. M. Helseth, C. C. Ebbesmeyer, C. A. Barnes, J. H. Lincoln: Bathymetrically Driven Transport in a Fjord: A Simple Demonstration Using a Physical Model of Puget Sound (O38), 1415h

M. Rattray, Jr., R. Miyamoto: Some New Developments in Turbulent Diffusion of Momentum in a Stably Stratified Fjord (O39), 1430h

L. J. Pietrafesa, G. S. Janowitz: Some Effects of Buoyancy Flux on Steady, 2-D, Baroclinic Continental Shelf Circulation (O40), 1445h

Break 1500h

J. D. Schumacher, R. L. Charnell, N. P. Laird, C. A. Pearson: Response of Current to Wind Near Cherry Point, Washington (O41), 1515h

R. A. Dalrymple, R. G. Dean, R. P. Stern: Wave-Induced Currents on Barred Coastlines (O42), 1530h

M. J. Bowman: Response of the Hudson River Plume to Hurricane Belle (O43), 1545h

Bruce Magnell, John R. Bennett: A Two-Dimensional Model of Nearshore Continental Shelf Circulation Applied Near the Coast of New Jersey (O44), 1600h

W. L. Wood: Dependency of Surf Zone Motions on Longshore Bottom and Wave Variability (O45), 1615h

Christopher N. K. Mooers: Coastally Trapped Long Waves (O46), 1630h

**Soil Water Parameters in the Unsaturated Zone I (H23-H27)**

Redwood (HI), Tuesday 0820h

A. W. Warrick (University of Arizona), Presiding

A. W. Warrick: Opening Remarks, 0820h

R. D. Jackson, R. J. Reginato, S. B. Idso: Solar and Thermal Radiation as Estimators of Soil Water Content (Invited Paper, H23), 0830h

G. Vachaud, J. Tcheh, M. Vauclin: Comparison of Field Measurement of Evapotranspiration Using a Zero Flux Method and an Energy Balance Method (Invited Paper, H24), 0855h

T. W. Sammis: The Variability of Soil Moisture Under Desert Vegetation (H25), 0920h

P. G. Saffigna, W. R. Gardner, D. R. Keeney: Lysimeter and Field Measurements of Leaching Under Irrigated Potatoes in a Loamy Sand (H26), 0945h

Break 1010h

J. G. McColl: Retention of Soil Moisture Following Forest Cutting (H27), 1030h

Discussion 1055h

**Soil Water Parameters in the Unsaturated Zone (H28-H35)**

Redwood (HI), Tuesday 1315h

D. E. Rolston (University of California), Presiding

Opening Remarks 1315h

J. M. Davidson: Measurement and Precision of Soil-Water Content Versus Hydraulic Conductivity Relationships (H28), 1320h

A. W. Warrick, G. J. Mullen, D. R. Nielsen: Scaling Field-Measured Soil Hydraulic Properties by a Similar Media Concept (H29), 1345h

R. E. Smith: Effects of Random Variation in Soil Parameters Relating to Infiltration Patterns (H30), 1410h

F. G. Baker: Variability of Hydraulic Conductivity in Silty Soils (H31), 1435h

Break 1500h

L. R. Ahuja, R. E. Green: Simplified Functions Approaches for Simultaneously Determining Both Hydraulic Conductivity and Water Characteristics of Soil From Field Tensiometric Data (H32), 1530h

D. L. Brakensiek, C. A. Onstad: Field Based Estimation of Green AMPT Parameters (H33), 1555h

G. Coleman, G. A. Gander, E. D. Rhoades: Spatial and Temporal Variability of Soil Moisture on a Natural Rangeland Watershed (H34), 1620h

D. B. Leszczynski: Nitrate Movement in a Silt Loam Soil During Freezing and Thawing (H35), 1645h

**Estuarine and Nearshore Physical Processes II—Poster Session (O49-O53, H, M)**

California-Washington (HI), Tuesday 1400h

D. M. Conlon (Office of Naval Research), Presiding

J. B. Matthews: The Season Circulation of the Glacier Bay Fjord System, Alaska (Invited Paper, O79A), 1400h

Dong-Ping Wang, A. J. Elliott: Low-Frequency Variability of the Potomac River Estuarine Circulation (O80), 1400h

E. B. Thornton, T. T. Lee, K. P. Black: Wave Transformation Across a Coral Reef (O81), 1400h

R. L. Gordon: Internal Waves Within Submarine Canyons (O82), 1400h

S. P. Hayes, D. Halpern: A Study of the Bottom Boundary Layer off the Oregon Coast (O83), 1400h

K. W. Hess: Comparison of Computer Times for Numerical Models of Bay Tides and Surges (O84), 1500h

W. S. Brown: The Cooling-Off of the Gulf of Maine (O85), 1600h

C. L. Tang: Objective Analysis of the Quasi-Geostrophic Currents in the Magdalen Shallows, Gulf of St. Lawrence (O86), 1500h

R. H. Bourke, R. G. Paquette: Atlantic Water on the Chukchi Shelf (O87), 1500h

F. W. Morris IV: Evaluation of Flushing in Tidal Canals Using a Hybrid Computer Model (O88), 1500h

Eddy C. Carmack: Spring Overturn and the Onset of Stratification in a Fjord Lake (O89), 1600h

David A. Brooks: Barotropic Long Waves Trapped Over the Cape Fear Continental Shelf and Slope (O90), 1600h

James R. Holbrook, David Halpern: Observations of Near-Surface Currents in the Strait of Juan de Fuca During February-May 1976 (O91), 1600h

G. A. Meadows: Long Period Fluctuations in Longshore Currents (O92), 1600h

J. Ernest Breeding, Jr.: Snell's Laws for Wave Packets: An Experimental Verification (O93), 1500h

# Methodologies for Environmental Assessments in Energy Development Regions I (H36-H40)

Redwood (HI), Wednesday 0830h

**T. D. Steele** (U.S. Geological Survey), Presiding

**Ronald D. Hill:** EPA's Environmental Assessments Related to Mining in Energy-Development Regions (Invited Paper, H36), 0830h

**R. Sung, J. E. Cotter:** Sources of Groundwater Pollutants From Oil Shale Recovery Processes (Invited Paper, H37), 0900h

**D. P. Lettenmaier:** Application of Intervention Analysis to Environmental Impact Assessment (H38), 0930h

Break 1000h

**G. A. Miller:** Environmental Hydrologic Baseline Program, Federal Prototype Oil Shale Leases, Piceance Creek and Uinta Basins, Colorado and Utah (Invited Paper, H39), 1020h

**T. G. Sanders, D. D. Adrian:** Sampling Frequency for Water Quality Monitoring (H40), 1050h

**T. D. Steele, R. D. Hill, Moderators:** Panel Discussion, 1120h

# Methodologies for Environmental Assessments in Energy Development Regions II (H41-H45)

Redwood (HI), Wednesday 1330h

**R. D. Hill** (Environmental Protection Agency), Presiding

**T. D. Steele, I. C. James II:** Application of Residuals-Management Techniques to the Assessment of Water-Resources and Environmental Impacts of Coal Development in the Yampa River Basin, Colorado and Wyoming (Invited Paper, H41), 1330h

**D. B. McWhorter, J. W. Rows:** Inorganic Water Quality in a Surface Mined Watershed (Invited Paper, H42), 1400h

**J. L. Beckner:** Geohydrologic Data Required for Environmental Statements (Invited Paper, H43), 1430h

Break 1500h

**C. H. Judy, D. A. Hunt:** Wastewater Management Planning in an Energy Impacted Area of Montana (H44), 1520h

**E. T. Engman, G. C. Stawson, Jr., V. R. Kranz:** A Methodology for Regional Analysis of Interrelated and Cumulative Impacts of Power Plant Development (H45), 1550h

**R. D. Hill, T. D. Steele, Moderators:** Panel Discussion, 1620h

# Use of Aquifer Systems for Cyclic Storage I (H46-H51)

Redwood (HI), Thursday 0830h

**M. L. Gould** (California Department of Water Resources), Presiding

Opening Remarks 0830h

**W. R. Whitehead, E. J. Langhette:** Use of Bounding Wells to Counteract the Effects of Preexisting Groundwater Movement (H46), 0840h

**D. B. Grove, L. F. Konikow:** Modeling Cyclic Storage of Water in Aquifers (Invited Paper, H47), 0900h

**Herbert W. Greydanus:** Management Aspects of Cyclic Storage in Aquifer Systems (Invited Paper, H48), 0920h

Break 0940h

**Victor E. Gleason:** The Legalization of Groundwater Storage (Invited Paper, H49), 1000h

**Ahmad A. Hassan:** Role of Mathematical Models in the Quantity and Quality Control of Cyclic Storage of Water in Aquifers (Invited Paper, H50), 1020h

**Tyler B. Coplen, L. C. Dutcher:** Determination by Stable Isotopes of the Ratio of Artificial Recharge to Native Ground Water in Wells From the Santa Clara Valley, California (H51), 1040h

# Use of Aquifer Systems for Cyclic Storage II (H52-H58)

Redwood (HI), Thursday 1330h

**P. P. Lofgren** (U.S. Geological Survey), Presiding

**Glen L. Faulkner:** Short-Term Storage of Freshwater in Saline-Water Aquifers in Florida—A Potential Solution to Water Shortage (Invited Paper, H52), 1330h

**F. W. Meyer, J. E. Hull, W. A. J. Pitts, Jr.:** Cyclic Storage of Freshwater in a Saline Artesian Aquifer, Miami, Florida (Invited Paper, H53), Withdrawn

**C. F. Tsang, M. J. Lippmann, P. A. Witherspoon:** Numerical Modeling of Cyclic Storage of Hot Water in Aquifers (H54), 1350h

**F. J. Molz, J. C. Warman, T. E. Jones:** Transport of Water and Heat in an Aquifer Used for Hot-Water Storage: Experimental Study (H55), 1410h

Break 1430h

**B. E. Lofgren:** Using Compressible Aquifer Systems for Cyclic Storage (Invited Paper, H56), 1450h

**R. A. Longenbaugh, Hilton Chen, Wanchai Ghooprasert:** Evaluation of Artificial Recharge to Meet Pumping Demands, South Platte Canal, Colorado (H57), 1510h

**K. J. Edworthy, D. A. Stott, W. B. Wilkinson:** Research Into the Physical and Chemical Effects of Artificial Recharge—Preparation for Operational Use of Aquifer Storage in the London Area, U.K. (H58), 1530h

**S. P. Larson, S. S. Papadopoulos, J. W. Mercer:** Transport of Water and Heat in an Aquifer Used for Hot Water Storage: Digital Simulation of Field Results (Invited Paper, H58A), 1550h

Closing Remarks 1610h

# Hydrologic Models (H59-H68)

Pacific Heights-Presidio (JT), Friday 0830h

**H. W. Anderson** (formerly U.S. Forest Service), Presiding

**M. E. Moss, E. J. Gilroy:** The Role of Model Error in Hydrologic Network Design (H59), 0830h

**S. J. Burges, J. O. Noetzelman:** A Linear Programming Approach for Estimating Probability Bounds for Large Flood Events (H60), 0845h

**F. R. Crow, M. D. Paine, T. Ghermazien:** Sensitivity of a Hydrology Runoff Simulation Model to Changes in Soil and Land Use Parameters for Grassland Watersheds (H61), 0900h

**L. W. Mays, Y. K. Tung:** State Variable Model for Sewer Network Flow Routing (H62), 0915h

**S. Phamwong, Y. S. Fok:** Storm Runoff Simulation for Urban Area in Oahu, Hawaii (H63), 0930h

**H. W. Anderson:** Normalized Suspended Sediment Discharge Related to Watershed Attributes and Landslide Potential (H64), 0945h

Break 1000h

**Robert P. Schreiber, John L. Wilson:** A Groundwater-Surface Water Conjunctive Use Model (H65), 1030h

**A. Afshar, M. A. Marino:** Mathematical Model for Simulating Soil Moisture Flow Considering Evapotranspiration (H66), 1045h

**M. Binark, L. Duckstein, E. Plate:** Multisite Rainfall Generation for Multisite Flood Simulation (H67), 1100h

**E. J. Plate, M. Binark:** On Multisite Generation of Daily Discharges by Means of a Pulse Process (H68), 1115h

# Hydrologic Potpourri (H69-H76)

Pacific Heights-Presidio (JT), Friday 1300h

**R. R. Ziemer** (U.S. Forest Service), Presiding

**Lawrence J. Onesti, Theodore K. Miller:** The Relationship Between Drainage Network Classification Systems and Selected Hydromorphic Variables (H69), 1300h

**Richard S. Jarvis:** Network Effects in Stream Link Length Distributions (H70), 1315h

**E. D. Andrews:** Hydraulic Adjustment of an Alluvial Stream Channel by Scour and Fill (H71), 1330h

**B. J. Choudhury, T. K. Schmugge, A. Chang:** Effect of Surface Roughness on the Microwave Brightness Temperature of Soils (H72), 1345h

**J. L. McGuinness, F. W. Chichester, R. W. Van Keuren, W. M. Edwards:** Water Balances on Small Pastured Watersheds (H73), 1400h

**R. F. Kilmartin:** Hydroclimatology: A Needed Cross Discipline (H74), 1415h

**William I. Linlor:** Snow Wetness Data From Automatic Remote Stations for Water Runoff Forecasting (H75), 1430h

**Vulli L. Gupta, James M. Federici:** Precipitation Data Network Design by Maximizing the Information Gain (H76), 1445h

**Mark H. Houck:** The Effects of Increasing Energy Demand on Reservoir System Operation: An Example (H76A), 1500h



Fredag 10 december

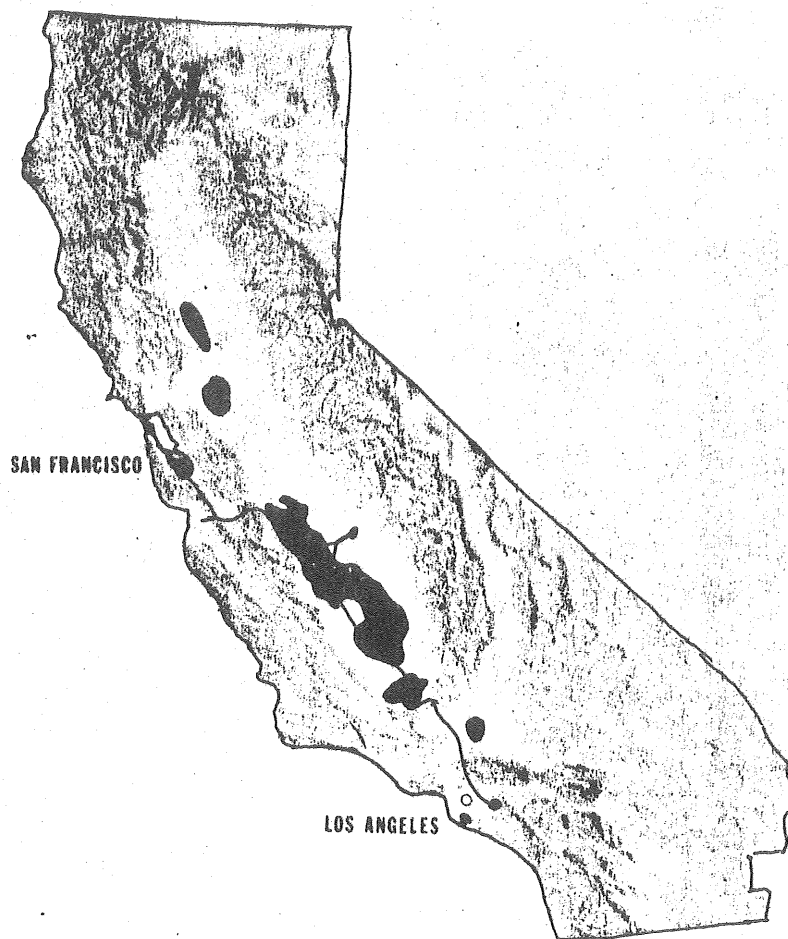
Exkursion San Francisco-Fresno 420 km

Internationella symposiet om marksättningar utgjorde en fortsättning av AGU:s möte i San Francisco. Mellan de båda mötena var en exkursion inlagd. Denna startade i San Francisco och gick genom Californiens områden med marksättningar ned till Anaheim. Exkursionen varade i två dagar med en övernattnig i Fresno.

Till exkursionen hade en högst förträfflig guide-bok framtagits. Av denna framgick inledningsvis att Californien är "the champion of the world" beträffande marksättningar, det största antalet orsaker till sättningarna, den största magnituden och de mest utspridda av människan orsakade marksättningarna. Fyra olika orsaker till sättningar, 9 m maximal sättning och ca 16.000 km<sup>2</sup> område med sättningar skulle studeras under exkursionen. Under 20 år har precisionsmätningar och forskning pågått varför såväl dokumentation som förståelsen av marksättningarna var mycket hög.

I figur 1 är markerade de områden i California som har marksättningar samt exkursionsrouten.

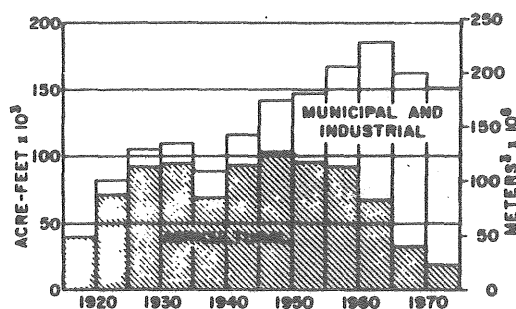
Första studieobjektet på exkursionen var Santa Clara valley. Dalen är ett tråg begränsat i norr av San Francisco-bukten, i väster och syd-väst av Santa Cruz-bergen och i öster och nord-öst av Diablo-bergskedjan. San Andreas-förkastning löper några km syd-väst om dalgångens plan och Hayward-förkastningen utgör begränsning mot nord-öst. Omkring 90% av årsnederbörden faller under nov-april vilket medför att konstbevattning måste tillgripas för agrikulturell produktion. Utvecklingen av bevattningssystem startade omkring 1900 och nådde maximum vid andra världskrigets slut. Sedan 1945 har det allt större befolkningstrycket medfört ökad urban area och minskade agrikulturella områden. Mängden vatten som



Figur 1. Karta över Californien med markerad exkursionsroute.  
Svarta fält markerar områden med marksättningar.

utnyttjas inom Santa Clara valley har dock hela tiden ökat, se figur 2, fram till mitten av 1960 då vatten från andra områden på allvar importerades till området. För närvarande importeras lika mycket vatten som produceras inom området.

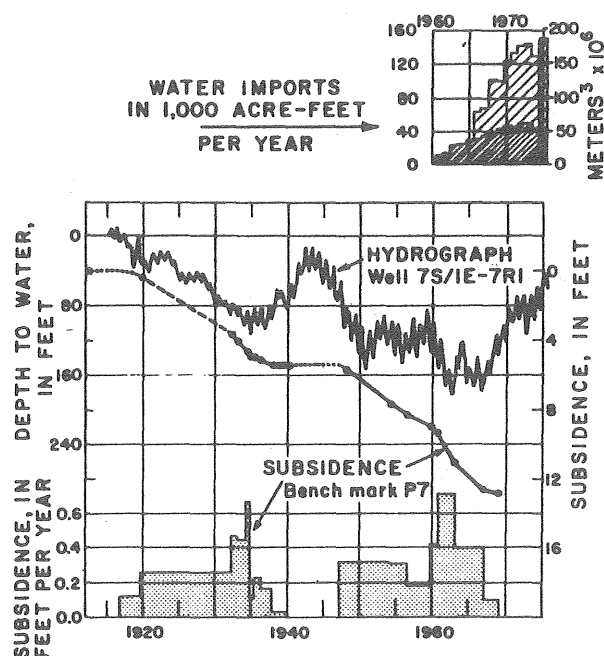
De vattenförande avlagringar i dalgången är 400-500 m mäktiga okonsoliderade alluviala avlagringar. Dessa är i dalgångens centrala delar till ca 2/3 täckta av mindre permeabla lager. Runt dalgångens sidor är grundvatten-



Figur 2. Grundvattenuttag i Santa Clara valley.

magasinet öppet och den naturliga grundvattenbildningen sker till största delen genom perkolation från vatten- drag inom dessa zoner.

Marksättningar inom området noterades för första gången 1932 då National Geodetic Survey på nytt avvägde en fixpunkt (P7) som etablerats 1912. Avvikelsen på 1,2 m för- anledde etablering av ett helt system av fixpunkter som

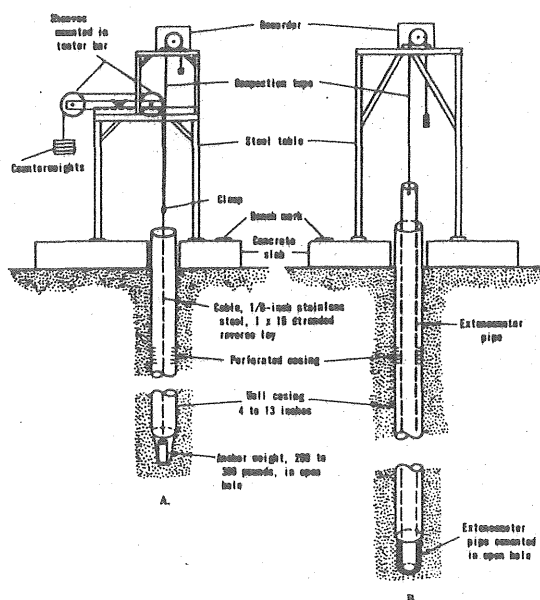


Figur 3. Grundvattentryckets förändring och uppmätt marksättning vid fixpunkt P7 i Santa Clara valley.

sedan avvägts 12 gånger mellan 1934 - 1967. I figur 3 visas uppmätt marksättning och vattennivå vid den nämnda fixpunkten (P7).

Marksättningen i Santa Clara valley har orsakat ett flertal allvarliga problem. Markområden i anslutning till San Francisco-bukten har sjunkit 0,6 - 2,4 m sedan 1912 vilket medför att konstruktioner till skydd mot översvämning behövt byggas för kontroll av vattendragen. Att området närmast bukten utnyttjas till evaporationsdammar för saltutvinning (78 km<sup>2</sup>) har inte underlättat situationen. Andra olägenheter av marksättningarna är förstörda brunnar, åtskilliga hundra, som genom markens hopsjunkning knäckts.

1960 installerades av USGS extensiometrar inom dalgången. Vid en av exkursionslokalerna besågs två av dessa mätare. Två typer av mätare utnyttjades som illustreras i figur 4, i den ena utgör stålwire, i den andra stältub båda förankrade ca 300 m ned i mark den konstanta mätkroppen.



Figur 4. Skrivande extensiometer. A kapeförankring. B rörförankring.

Effekter av temperatur och tryck på sättningssmätningarna negligerades i denna klimattyp med mycket konstanta temperaturer året om. Inom hela Santa Clara valley fanns ca 40 mätplatser som komplement till den geodetiska avvägningen av fixpunkter.

För att stoppa marksättningarna måste vattenbehovet tillgodoses utifrån. Sedan 1930-talet har arbetet med marksättningar och vattenutnyttjande utgått från

- 1- tillvaratagande av ytvatten och avloppsvatten
- 2- import av vatten från andra områden

Under 1940 började vatten importeras utifrån i samband med att San Francisco såg sig om efter vatten från avlägsna trakter. 1965 kom dock det stora tillskottet i importerat vatten och 1975 var importen ca 185 Milj m<sup>3</sup>/år. Av detta importerade vatten utnyttjas en del direkt till vattenförsörjning och bevattning, en del till förstärkning av grundvattentillgången i området och en del till att förhindra saltvatteninträngning. Andra studieobjektet var infiltrationsanläggning för grundvattenförstärkning samt i samband härmed allmän information om dalgångens vattenproblem.

Det vatten som importeras till Santa Clara valley kommer från omgivande högländer där det magasineras i stora dammar. Via ledningssystem och öppna kanaler leds vattnet ned till dalgången. Före infiltration i öppna dammar behandlas vattnet för att minska susp-halten. En enkel försedimentering tar härvid ca 6 månader men med tillsats av en polyelektrolyt minskas uppehållstiden till ca 2 timmar. I dammarna uppmätts en infiltrationshastighet av 3 m/dygn under initialskedet för att efter ca 2 månader ha minskat till 1,5 m/dygn. Bassängen tas ur drift när infiltrationshastigheten går ned till 15 cm/månad, varefter det översta skiktet i dammbalken schaktas av och botten plogas.

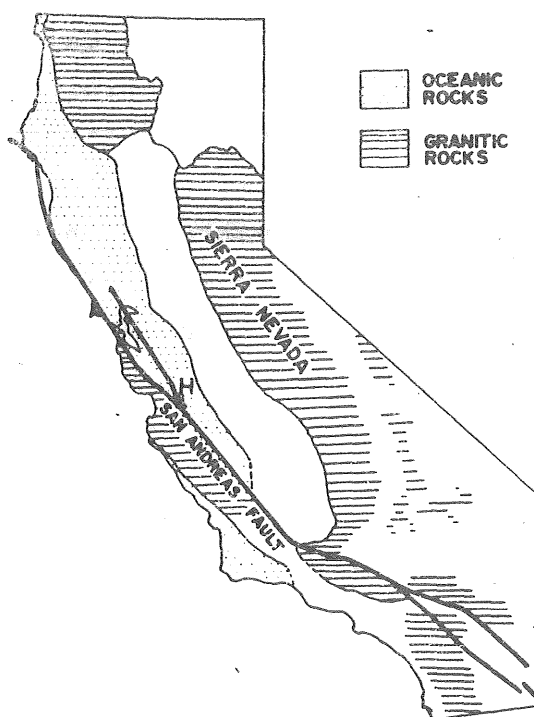
Dagvatten utnyttjades inte i större utsträckning som infiltrationsvatten då i första hand magasin för tillvaratagande av dagvatten saknades. De stora magasinerna fanns i stället uppe i bergen. Däremot gjordes försök att infiltrera behandlat avloppsvatten där ett jämnare flöde kunde påräknas. Till en kostnad av ca 3 öre/m<sup>3</sup> kunde behandlat avloppsvatten på detta sätt omhändertas.

Inom området beräknades den potentiella avdunstningen från fri vattenyta vara 1-1,5 m/år men av underordnad betydelse för att ta med i beaktande vid infiltration.

Dagens tredje studieobjekt var markförskjutningar längs de aktiva förkastningszonerna i Californien. I Santa Clara valley förenar sig de två aktiva tektoniska linjerna San Andreas och Calaveras. Enligt guide-boken förklaras Hollister lokalisering till en plats längs en aktiv förkastningszon med att källor och grunda sjöar tidigare fanns här. Detta är karakteristiskt för förkastningar i Californien, vilka utgör begränsningar vanligtvis täta för vattenrörelserna med resultat att källor uppkommer. Av de båda förkastningarna studeras vid Hollister, se figur 5, Calaveras som rör sig med 5-10 mm per år. I San Andreas förkastning som nu inte rör sig uppbyggs i stället spänningar som någon gång måste utlösas och då med förödande effekter. Många profetsior finns när nästa rörelse eller spänningsuttömning längs San Andreas-förkastningen kommer.

Vid stoppet i Hollister studerades utrustning för mätning av rörelserna utefter Calaveras-förkastningen liksom skador orsakade av dessa rörelser.

San Andreas-förkastningen som studerades vid lokalen San Juan Bantista i samband med lunch, är den dominerande förkastningen i Californien. Den utgör del av gränsen mellan de Pacifikiska och Nordamerikanska tektoniska plattorna, varvid en Pacifikiska rör sig åt nord-väst relativt den Nordamerikanska.



Figur 5. San Andreas och Calaveras-förkastningarna. H = Hollister.

Längs San Andreas-förkastningen är rörelsen till helt övervägande del horisontell. Man har beräknat att under de senaste 20 miljoner åren har San Andreas-förkastningen rört sig 290 kilometer. Större delen av denna rörelse anses ha ägt rum under de senaste 10 miljoner åren. Totalt torde under de senaste 100 miljoner åren en rörelse av mer än 500 km ha ägt rum. I medeltal är rörelsen nu 30 mm/år som sker vid enstaka tillfällen som nämnts tidigare. De senaste större rörelserna var 9 januari 1857 i södra delen av förkastningen (norr och väster om Los Angeles) samt 18 april 1906 i norra delen (norr och söder om San Francisco). Vid den senare jordbävningen dödades 500 personer (av 400.000 som drabbades) i San Francisco och 200-300 personer i närliggande områden. Stål och träbyggnader klarade jordbävningen bra, men den efterföljande branden som varade i tre dygn förstörde byggnader av dessa konstruktioner.

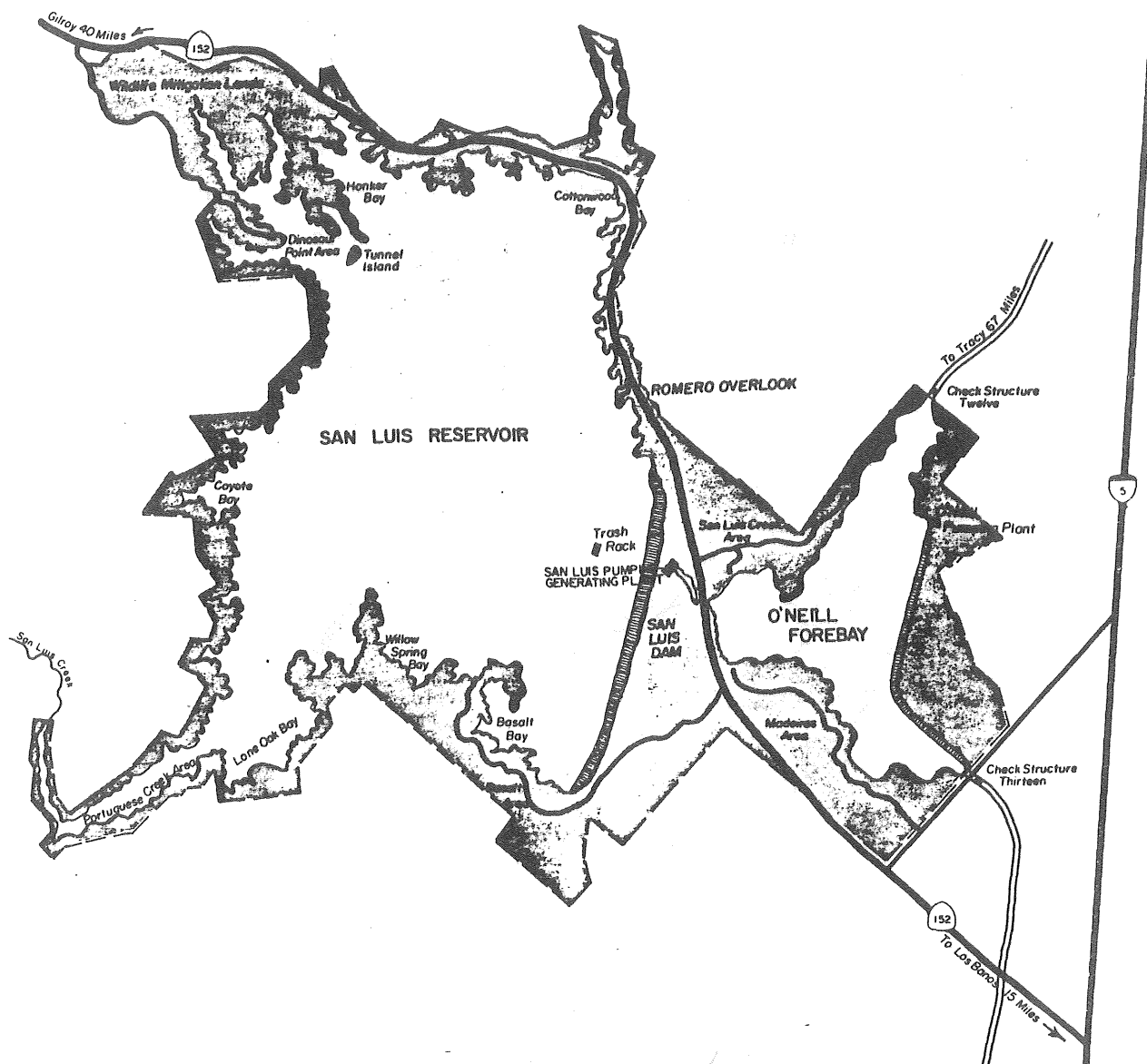
San Luis reservoaren belägen på östra sluttningen av bergs-



kedjan Diablomellan Santa Clara och San Joaquin dalgångarna var fjärde studieobjektet under dagens exkursion. Reservoaren utgör huvudmagasinet i California State Water Project och the Federal Central Valley Project. Den är samtidigt den största "off-stream" reservoaren i USA. Med "off-stream" reservoar menas en reservoar som inte kan fyllas med vatten från eget avrinningsområde utan vatten måste pumpas dit. Vatten pumpas till San Luis reservoaren från Sacramento-San Joaquin deltat huvudsakligen under vinter och vår då överskott av vatten finns. Pumpstationer lyfter vattnet via kanalsystem till O'Neil Forebay, se figur 6, varifrån det pumpas upp i reservoaren för magasinering. När Sacramento-San Joaquin deltat har ont om vatten leds magasinet vatten tillbaka i kanalsystem som kallas California Aqueduct. Samma maskiner som pumpar upp vattnet till reservoaren kan utnyttjas för att alstra energi när vattnet återförs till kanalsystemet. Sektionen av California Aqueduct nedströms San Luis reservoaren är imponerande, 73:s bredd upptill och 34 m nedtill med ett vattendjup av 10,6 meter.

San Luis reservoaren rymmer totalt 2.500 milj m<sup>3</sup> vatten. Den har vid maximal fyllnadsgrad en yta av 51 km<sup>2</sup> samt ett max-djup av 83,5 m. Genom reservoaren går Ortigalita förkastningen längs vilken alluvium blivit nedsänkt till 520 m:s djup.

Dagens sista studieobjekt var marksättningar inom San Joaquin valley. Denna dalgång representerar ungefär de sydliga 2/3 av Central Valley i Californien. Den begränsas i öster av Sierra Nevada, i väster av kustbergen, i söder av Tehachapi bergen och i norr av deltalandet vid sammanflödet mellan San Joaquin och Sacramentofloderna. Den relativt flacka dalbotten omfattar ca 26.000 km<sup>2</sup> av högproduktiv jordbruksmark. Dalgången är ca 400 km i nordväst-sydöstlig riktning och 40-90 km bred.

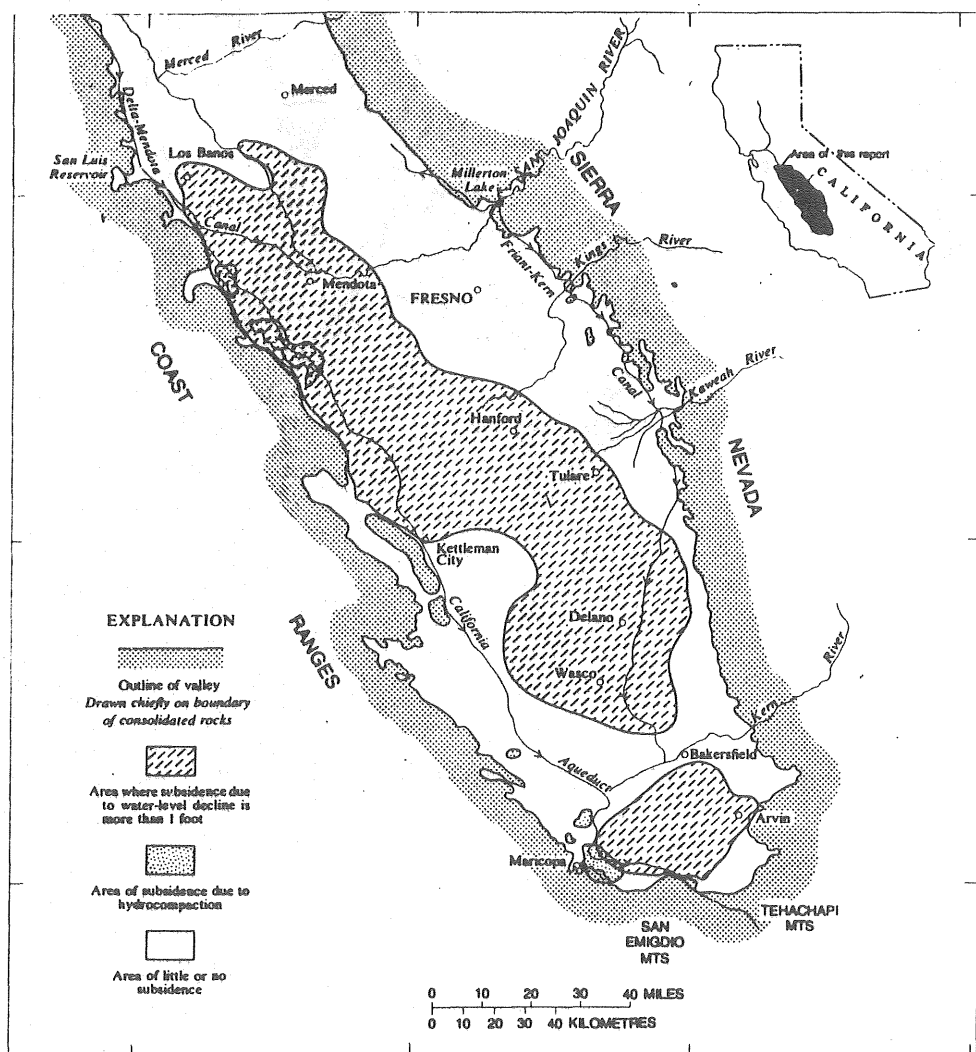


Figur 6. Karta över San Luis reservoaren och O'Neil Forebay.

San Joaquin valley utgör ett strukturellt tråg med längd-axel i nordväst-sydöstlig riktning. Under sen kritatid och större delen av tertiärtiden deponerades över tusen meter av marina sediment i detta tråg som hela tiden sänkte sig. Över dessa sediment finns kontinentala tertiära och kvartära avlagringar.

San Joaquin valley är det största enskilda agrikulturella området i USA. Varmt sommarklimat, mycket bördiga jordar

och väl utbyggt bevattningssystem bidrager till att göra området till landets "kornbod" nummer ett. De huvudsakliga produkterna är bomull, biffdjur, säd, druvor, foderprodukter, potatis, frukter och grönsaker. Beroende av marknadsläget odlas någon eller några av produkterna mer intensivt. De flesta av de odlade produkterna fordrar bevattning och efterfrågan på yt- och grundvatten är stort. Detta förstår man också av att stundtals fyra skördar kan tas ut per år. Inom dalgången finns också oljeproduktion och förädlingsindustri för jordbrukets produkter.



Figur 7. Områden med marksättningar i San Joaquin valley.

Fyra olika orsaker till marksättningar uppträder inom San Joaquin valley. I avtagande areell betydelse är de följande

1. Marksättning orsakad av grundvattenuttag.
2. Marksättning orsakad av kompaktion vid bevattning (hydrocompaction).
3. Marksättning på grund av nedbrytning av organiska jordar.
4. Marksättning på grund av oljeuttag och till viss del av tektonism.

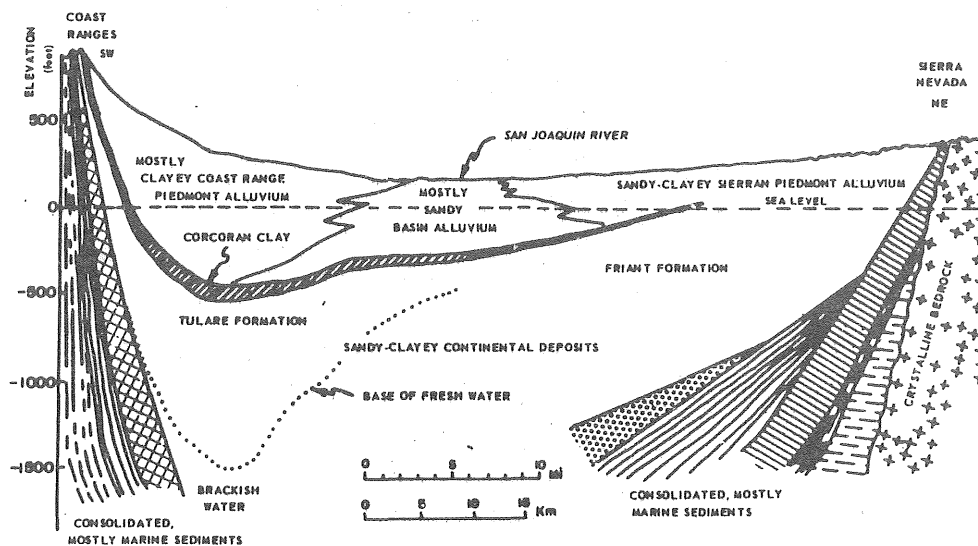
I figur 7 visas de områden som drabbats av marksättningar inom dalgången.

Grundvattentillgångarna i San Joaquin valley kan generellt sägas finnas i tre olika grundvattenmagasin.

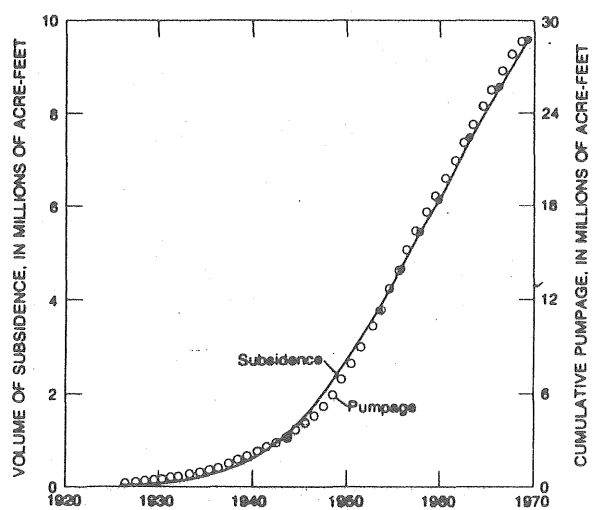
1. Grundvattentillgång i öppen akvifer i översta alluviala avlagringarna nedåt begränsad av Corcoran Clay, se figur 8.
2. En mycket utbredd sluten grundvattentillgång under Corcoran Clay.
3. Salint grundvatten som underlagrar ovan nämnda grundvattentillgång.

Som framgår av figur 9 saknas Corcoran Clay i dalgångens östra delar varför de båda första grundvattenmagasinen där är samverkande.

Grundvattenuttag för bevattning har sedan andra världskriget varit enorm inom dalgången, speciellt inom dess västra sida där ytvattentillgångarna varit mycket begränsade. Under 1950-talet pumpades i området mer än 1/4 av allt grundvatten som utnyttjades för bevattning i USA. En utbredd pumpning började omkring 1900 och har ökat fram till mitten av 1960-talet. I figur 9 anges den totalt uppumpade grundvattenmängden och motsvarande total marksättning. År 1964 uppumpades i San Joaquin valley ca 12.300 milj m<sup>3</sup> från uppskattningsvis 40.000 stora brunnar med djup mellan 100-900 m och kapaciteter



Figur 8. Geologisk profil genom San Joaquin valley.



Figur 9. Kumulativa volymer av uttaget grundvatten och registrerade marksättningar i San Joaquin valley 1926-69.

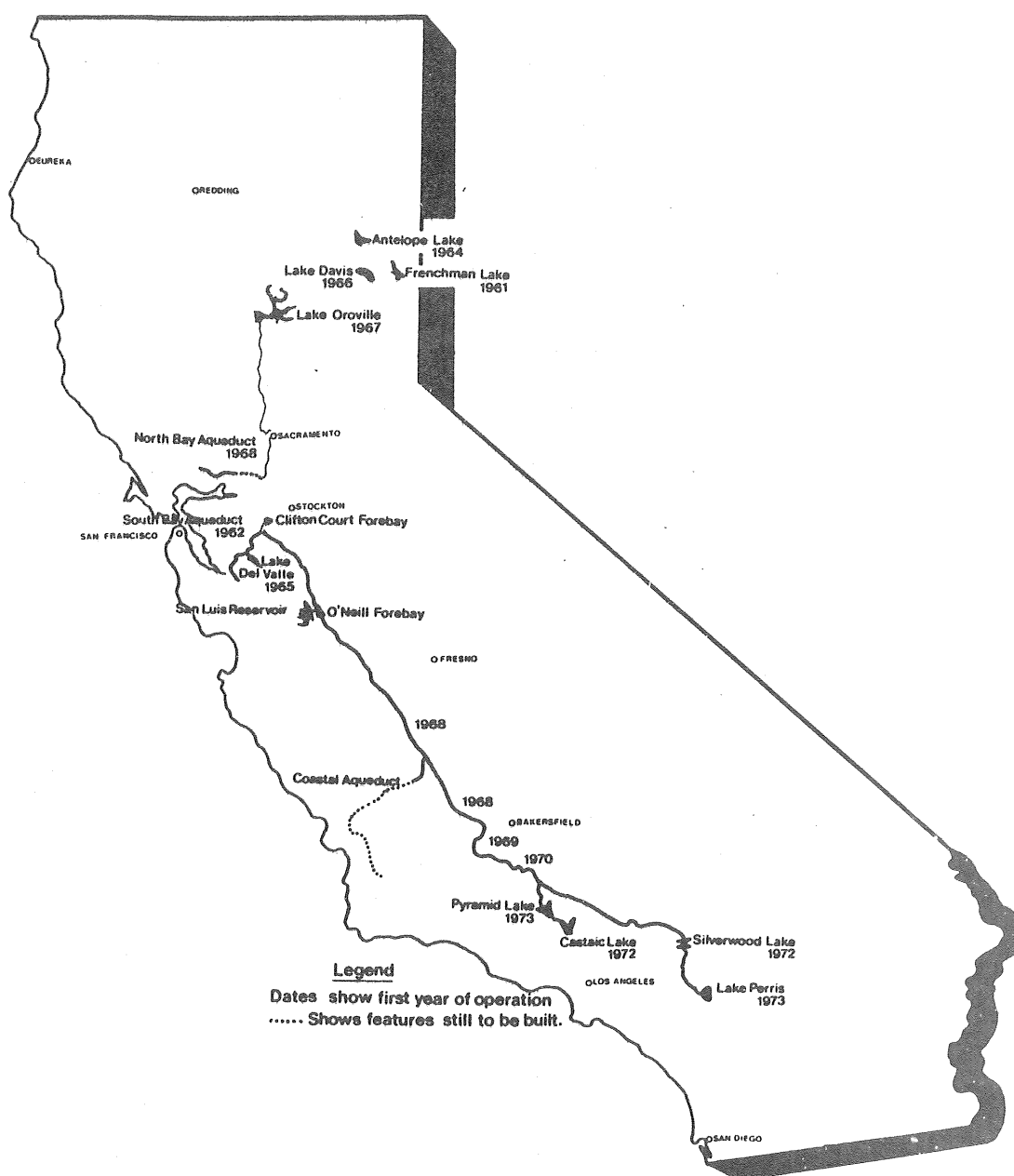
mellan 0,8 - 7 m<sup>3</sup>/min. I början av 1960 hade grundvattenytan avsänkts till sådan nivå att grundvattnet i dalgångens brunnar i medeltal måste lyftas 150 m. Dessa brunnar har en gångtid på 3/4 år per år.

Import av ytvatten till områdets nordöstra delar startades 1950 genom tillkomst av Friant-Kern kanalen. Denna utsträcktes successivt mot sydöst och 1966 var även Arvin-området försett med bevattningskanal. På den västra sidan startade Delta-Mendota bevattningskanal att byggas i början av 1950-talet. 1968 började projektet California Aqueduct. 1970 hade detta bevattningskanalsystem nått Tehachapi mountain i söder. Resultatet av dessa stora ytvattentillskott genom kanalsystemen har varit ett minskat grundvattenuttag, stigande grundvattenytor och avtagande sättningshastighet.

California State Water Project är värd en kort redogörelse. Projektet har till syfte inte endast att leverera försörjnings- och irrigationsvatten utan innefattar vattenregleringar till skydd mot översvämningar, kraftproduktion, vatten för kvalitetsförbättring och rekreation.

Projektet startar i nordöstra delen av Californien med de så kallade Upper Feather River lakes. Oroville dammen kontrollerar vattnet i Feather River och kraftstationen där Edward Hyatt producerar 2.475 Mkwh per år. I figurerna 10 och 11 visas projektet i plan och profil. Från Oroville Lake transporteras vattnet i sitt naturliga lopp ned till Delta-området. Genom North Bay och South Bay Aqueduct levereras vatten till området kring San Francisco Bay inklusive Santa Clara valley.

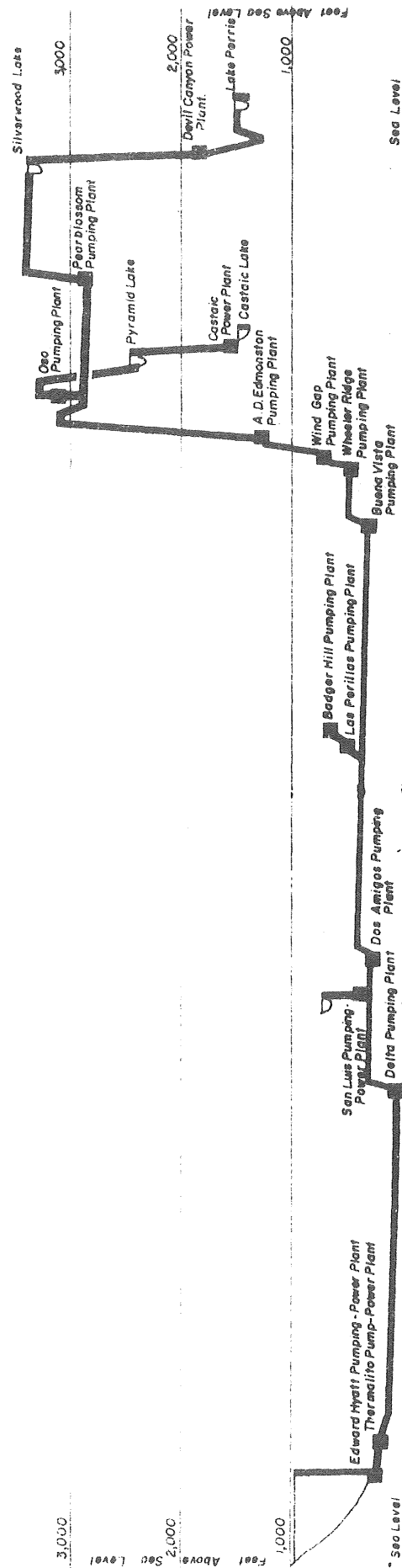
California Aqueduct som sträcker sig mer än 710 km transporterar vatten ned till södra Californien. Via sju stycken pumpstationer når vattnet ned till Orange County sydöst om Los Angeles, se figurerna 10 och 11. Totalt är California State Water Project 965 km långt och när vattnet når de sydliga områdena i Californien har det pumpats nästan 1.100 m upp från havets nivå.



Figur 10. Karta över California State Water Project.

Totalt transporterades år 1974  $3.000 \text{ Mm}^3$ , dvs ca  $95 \text{ m}^3/\text{sek}$  i projektet. Hela projektet beräknas dock kunna leverera  $5.200 \text{ Mm}^3/\text{år}$ , dvs ca  $165 \text{ m}^3/\text{sek}$  vid full årskapacitet. 35% av levererat vatten år 1974 ( $1.050 \text{ Mm}^3$ ) utnyttjades för bevattningsändamål varvid  $1.200 \text{ km}^2$  bevattnades, huvudsakligen i södra San Joaquin valley. I Sverige förbrukades under 1976 ca  $64 \text{ Mm}^3$  vatten för bevattningsändamål och  $942 \text{ Mm}^3$  för kommunal vattenförsörjning, dvs sammanlagt ca 35% av den vattenmängd som California State Water Project levererade 1974.





Figur 11. Sektion genom California State Water Project.

Trots att den maximala marksättningen inom San Joaquin valley uppgår nästan till 9 m kan katastrofala sättningseffekter liknande dem vi kan se i Sverige, ej iakttagas i San Joaquin valley. Storleken av påverkat område gör det mycket svårt att i fält iakttaga eller demonstrera sättningarna. Skadorna finns dock där i form av förändrade lutningar i dräneringssystemen, skador på brunnar etc, skador som uppskattas till miljontals dollar.

Alla effekter av marksättningarna är dock inte negativa. Tre positiva effekter är omnämnda i guide-boken:

1. Det vatten som frigjorts från sedimenten genom kompaktion har medverkat till att reducera grundvattenytans avsänkning.
2. Avlagringarna som nu kompakterats har prekonsoliderats och ett framtida utnyttjande av magasinen för "cyclic-storage" är möjlig inom det prekonsoliderade området utom skadliga effekter. (Flera av uppsatserna vid AGU:s möte berörde denna typ av magasinering).
3. Området har utgjort ett stort experimentfält där enormt mycket värdefull information och kunskap inhämtats.

Skillnaden mellan dalgångarna Santa Clara och San Joaquin beträffande möjligheter och åtgärder för att återställa grundvattenytorna i de akviferer som genom grundvattenuttag avsänkts är följande.

I Santa Clara valley förekom inget tätande lager över grundvattenförekomsten varför ytvatten via infiltrationsdammar kunde tillföras akviferen. I San Joaquin valley förekommer ett mäktigt tätande lager över akviferen varför ytinfiltration icke är möjlig. För att här återställa grundvattenytan måste uttagen minskas och vattenbehovet lösas med ytvatten.

Lördag 11 december

Exkursion Fresno - Anaheim 380 km.

Dagens övningar startade med filmföreläsning om San Joaquin dalens jordbruk (The Big Land). Därefter besöktes Mendota försöksanläggning där problemen med kompaktion i samband med bevattning studerats.

På ett tidigt stadium under planeringen av California aqueduct projektet upptäcktes att marksättningar i jordar med låg densitet uppträdde i samband med vattenbegjutning. Dessa sättningar skulle orsaka skador på kanalerna då dessa ej kunde praktiskt byggas helt vattentäta. Sålunda måste dels områden med denna typ av sättningskänsliga jordar kartläggas, dels metoder för förkonsolidering av dessa jordar utarbetas. Mendota test stötte tillkom för att i första hand söka svaret eller lösningen till följande frågeställningar.

1. Det mest effektiva sättet för vattenbegjutning.
2. Den tid och den mängd vatten som erfordras för fullt utbildande av sättningarna.
3. Utveckling av alternativa metoder till vattenbegjutning för förkonsolidering.
4. Effekter av djupinjektion av stora mängder vatten.
5. Bästa kanalsektioner och utförande i de sättningsbenägna jordarna.

Försöken startade 1958 i ett 4 km<sup>2</sup> stort område vid Mendota och avslutades 1966. Storleken av de sättningar som uppmätts under försöksperioden var maximalt 3,5 m och i medeltal 2-2,5 m. Vibrofloatation testades också men befanns ej vara en lämplig metod i dessa finkorniga sediment.

Under den vidare färden gjordes besök vid en djurfarm där ca 40.000 kor fanns, samt vid en bomullsfabrik där

bomullsbalar tillverkades. I medeltal erhöles fem balar à ca 220 kg per hektar, dvs 1,1 ton bomull/ha.

Dagens sista studieobjekt var marksättningar i södra delen av San Joaquin valley orsakade av oljeutvinning. I området kring Arvin-Maricapa hade marksättningar upp till 2 m registrerats. Dessa fält hade utnyttjats under 1930-talet varefter fälten sparats som reserver för framtiden och fältet ansåg nu vara USA:s 3:dje störst potentiella oljetillgång. Den 15 mars 1910 i samband med oljeborrningar inträffade vid Lake View ett genombrott varvid 1,4 milj m<sup>3</sup> olja strömmade ut i en väldig kaskad. Resultatet blev att 39 nya oljebo-lag bildades under två veckors tid.

För tillfället uttogs de sista oljeresterna med de gamla oljepumparna genom att samtidigt injektera varmvatten i de nästan tömda oljelagren. Detta har som effekt att viskositeten höjs, oljan blir lättare att pumpa, samt att vattnet ersätter oljan och så att säga driver ut denna.

Vi anlände till Anaheim på kvällen och inkvarterades i konferenshotellet Inn at the Park i närheten av Disneyland..

#### Söndag 12 december

Konferensfri dag som ägnades besök på Disneyland samt sightseeing i Anaheim. På kvällen cocktailparty inför konferensstarten nästa dag.

#### Måndag 13 december till fredag 17 december

Second International Symposium on Land Subsidence

Symposiet var anordnat av följande organisationer:

International Association for Hydrological Science  
(IAHS)

International Association of Hydrogeologists (IAH)

International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE)

the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)

US National Committee for Scientific Hydrology (USNC/SH)

American Geophysical Union (AGU)

Symposiet ordnades inom arbetet med det internationella hydrologiska programmet.

Problemen med marksättningar var bland de teman som innefattades i det forskningsprogram som IHD poängterat som viktigt. I september 1969 hölls i Tokyo, Japan, det första symposiet om marksättningar som nu följdes av det andra symposiet. Syftet med symposiet var att samla de internationella specialisterna inom området, att presentera resultat av forskning och arbete inom området samt att utbyta erfarenheter.

Symposiet var indelat i 8 tekniska sektioner samt en fälttur enligt följande:

MONDAY, DECEMBER 13, 1976

TECHNICAL SESSION I (1100 - 1200 h)

Chairman: J. F. Poland

CASE HISTORIES, GROUND WATER

1. SOKI YAMAMOTO: Recent trend of land subsidence in Japan
2. R. K. GABRYSCH: Land-surface subsidence in the Houston-Galveston region, Texas
3. F. KURAMOCHI, M. ISHII, and T. ENDO: Recent tendencies of the land subsidence in Tokyo.

TECHNICAL SESSION II (1330 - 1700 h)

Chairmen: Dennis R. Allen and Ben E. Lofgren

CASE HISTORIES, GROUND WATER, continued

4. FIGUEROA VEGA ~~and~~ E. GERMAN: Subsidence of the City of Mexico, a historical review

5. ISMAEL HERRERA, JESUS ALBERRO, ROBERTO GRAVE, and JUAN JOSE HANELL: Development of artificial reservoirs by inducing land subsidence
6. K. IIDA, K. SAZANAMI, T. KUWAHARA, and K. UESHITA: Subsidence of the Nōbi Plain
7. T. KUWAHARA, K. UESHITA, and K. IIDA: Analysis of subsidence in the Nōbi Plain
8. L. CARBOGNIN, P. GATTO, G. MOZZI, G. GAMBOLATI, and G. RICCERI: New trend in the subsidence of Venice
9. SANTIAGO MARCHINI: The use of mud-jacking for the upheaving of urban zones; Computer control of the works; Experimental application to the problem of Venice
10. CARL C. WINIKKA and PAUL D. WOLD: Land subsidence in central Arizona
11. S. AOKI: Land subsidence in Niigata
12. BEN E. LOFGREN: Hydrogeologic effects of subsidence, San Joaquin Valley, California
13. JOSEPH F. POLAND: Land subsidence stopped by artesian-head recovery, Santa Clara Valley, California

TUESDAY, DECEMBER 14, 1976

TECHNICAL SESSION III (0830 - 1200)

Chairmen: Stanley N. Davis and R. Allen Freeze

#### MATHEMATICAL MODELS

14. T. N. NARASIMHAN and P. A. WITHERSPOON: Numerical model for land subsidence in shallow ground water systems
15. D. C. HELM: Estimating parameters of compacting fine-grained interbeds within a confined aquifer system by a one-dimensional simulation of field observations
16. E. JOHN FINNEMORE and MARY L. GILLAM: Compaction processes and mathematical models of land subsidence in geothermal areas
17. A. I. KASHEF and K. R. CHANG: Determination of land subsidence due to well pumping by numerical analysis
18. M. J. LIPPMANN, T. N. NARASIMHAN, and P. A. WITHERSPOON: Numerical simulation of reservoir compaction in liquid dominated geothermal systems
19. YAVUZ CORAPCIOGLU: Mathematical modeling of leaky aquifers with rheological properties
20. A. KAMATA, K. HARADA, and T. SHIBASAKI: Analysis of land subsidence by the vertical two dimensional multi-aquifer model
21. M. MURAKAMI, T. SIBASAKI, and Y. TAKAHASI: Land subsidence research and regional water resource planning of the Nanao Basin
22. S. OHMAKI: Analysis of long term oedometer test results

## TECHNICAL SESSION IV (1330 - 1700 h)

Chairman: R. O. Castle

## MEASUREMENT OF SUBSIDENCE

23. S. R. HOLDAHL: Mathematical treatment of California leveling data to determine heights and height changes
24. W. D. KAHN and F. O. VONBUN: Detectability of land subsidence from space

## OIL AND GAS FIELDS

25. O. NÚÑEZ and D. ESCOJIDO: Subsidence in the Bolivar Coast
26. J. B. SCHOONBEEK: Land subsidence as a result of gas extraction in Groningen, The Netherlands
27. R. C. ERICKSON: Subsidence control and urban oil production - A case history - Beverly Hills (East) Oil Field, California
28. KENNETH L. LEE: Calculated and observed subsidence and horizontal movements at Baldwin Hills, California
29. DENNIS R. ALLEN: Subsidence susceptibility: Methods for appraisal

Chairman: J. F. Poland

## INJECTION SYSTEMS

30. G. L. GATES, W. H. CARAWAY, and H. J. LECHTENBERG: Problems in injection of waters in Wilmington Oil Field, California
31. J. A. RANCILIO: Injection well operation and maintenance
32. JAMES B. FAIRCHILD and KARL H. WIEBE: Subsidence of organic soils and salinity barrier design in coastal Orange County, California

WEDNESDAY, DECEMBER 15

## FIELD TRIP

Chairman: Dennis R. Allen

0815 - 1730 h, Field trip to Long Beach and to Wilmington Oil Field

0900 - 0945 h, Slide talk

1030 h, Boat to islands

1200 h, Lunch, Queen Mary

1345 - 1445 h, Tour subsided areas

1500 - 1600 h, Barrier project and injection wells of the Los Angeles County Flood Control District

1600 - 1700 h, Return to Anaheim



THURSDAY, DECEMBER 16

## TECHNICAL SESSION V (0830 - 1200 h)

Chairmen: Robert T. Bean and John C. Stephens

## CASE HISTORIES, GROUND WATER

33. GEORGE H. DAVIS, HARLAN B. COUNTS, and S. R. HOLDAHL: Further examination of subsidence at Savannah, Georgia, 1955-1975
34. CHAROEN PIANCHAROEN: Ground water and land subsidence in Bangkok, Thailand
35. E. W. BRAND and A. S. BALASUBRAMANIAM: Soil compressibility and land subsidence in Bangkok
36. B. BROMS, L. CARLSSON, and A. FREDRIKSSON: Land subsidence in Sweden due to water-leakage into deep-lying tunnels and its effect on pile-supported structures
37. CHIAN-MIN WU: Groundwater depletion and land subsidence in Taipei Basin

## SUBSIDENCE DUE TO COAL MINING

38. C. S. GLOE: Land subsidence related to brown coal open cut operations - Latrobe Valley, Victoria, Australia
39. W. A. KAPP: The characteristics of a subsidence trough over an area of underground coal mining

## SUBSIDENCE AND FAULTING

40. THOMAS L. HOLZER: Ground failure in areas of subsidence due to ground-water decline in the United States
41. C. W. KREITLER: Fault control of land subsidence, Houston-Galveston, Texas
42. ROBERT D. NASON: Instrumentally measured fault movements due to subsidence

## TECHNICAL SESSION VI (1330 - 1700 h)

Chairmen: Richard R. Parizek and G. V. Chilingarian

## SUBSIDENCE IN CARBONATE ROCKS

43. RICHARD R. PARIZEK: Nature and causes of land subsidences in karst terranes
44. V. T. STRINGFIELD and J. R. RAPP: Land subsidence resulting from withdrawal of ground water in carbonate rocks
45. J. G. NEWTON: Induced sinkholes - A continuing problem along Alabama highways
46. PHILIP E. LAMOREAUX: Geopolitics and sinkholes
47. J. W. STEWART: Sinkholes: Subsidence features in west-central Florida
48. ROY J. GREENFIELD, PETER M. LAVIN, WALTER F. EBAUGH, and RICHARD R. PARIZEK: Geophysical methods for location of voids and caves
49. CHARLES F. WALL: A geophysical method of indicating relative sinkhole susceptibility
50. J. F. ENSLIN and R. J. KLEYWEGT: Artificial recharge of dolomitic ground-water compartments in the Far West Rand gold field of South Africa

FRIDAY, DECEMBER 17, 1976

TECHNICAL SESSION VII (0830 - 1200 h)

Chairmen: Piero Sembenelli and H. L. Koning

SALT EXTRACTION

51. F. T. HOWELL and P. L. JENKINS: Some aspects of the subsidences in the rock-salt districts of Cheshire, England
52. MURIS OSMANAGIĆ and IBRAHIM JASAREVIĆ: Land subsidence in the town of Tuzla due to uncontrolled salt extracting through boreholes

HYDROCOMPACTION

53. CLIFFORD LUCAS and LAURENCE JAMES: Land subsidence and the California State Water Project
54. BRUCE DENNESS, JON L. DARWELL, and BERNARD W. CONWAY: Prediction of metastable soil collapse
55. REY S. DECKER and ROBERT FREDERICKSON: Foundation treatment for small earth dams on subsiding soils

PREDICTIONS OF SUBSIDENCE

56. R. J. DE GLOPPER: The application of consolidation constants, derived from the pore space, in subsidence calculations
57. K. SATO and K. WATANABE: Prediction of land subsidence by means of time series analysis of water-level fluctuation in observation well
58. NIKOLA P. PROKOPOVICH: Quality of predictions of land subsidence along Delta-Mendota and San Luis Canals in California, USA
59. J. R. MAC MILLAN, R. L. NAFF, and L. W. GELHAR: Prediction and numerical simulation of subsidence associated with proposed groundwater withdrawal in the Tularosa Basin, New Mexico

TECHNICAL SESSION VIII (1330 - 1530 h)

Chairmen: Soki Yamamoto and A. I. Johnson

LEGAL AND ECONOMIC ASPECTS

60. RITA SINGER: Legal implications of land subsidence in the San Joaquin Valley
61. LONNIE L. JONES: Economic effects of land subsidence due to excessive groundwater withdrawal in the Texas Gulf Coast area

GEOLOGIC ASPECTS

62. EDWARD B. HANDS: Some data points on erosion and flooding for subsiding coastal regions

ORGANIC SOILS, SUBSIDENCE

63. JOHN C. STEPHENS and ERNEST H. STEWART: Effect of climate on subsidence of organic soils
64. R. L. TATE: Nitrification in Everglades histosols: A potential role in soil subsidence

Svenska bidraget på symposiet presenterades av under-tecknad och rörde ett stort intresse speciellt vad gäller mätmetodik i leror (piezometersondering) samt metoder att bygga tunnlar i berg. Uppsatsen bifogas reserapporten, se bilaga 2.

Som framgår av programmet ovan upptogs onsdagens program av en exkursion till Los Angeles hamn där marksättningen på grund av oljeexploatering inträffat.

I Los Angeles finns ett flertal oljefält av vilka Wilmingtonfältet är det största. Detta fält är beläget längs Los Angeles strandlinje med sträckning inåt och utifrån land. Detta innebär att del av oljefältet ligger under vatten och borrhålen dit går snett från land eller från speciellt uppbyggda öar. Oljefältet började exploateras på allvar 1938 och stora marksättningar registrerades vid hamnen under början av 1940-talet. Både sättningshastigheten och storleken av påverkat område ökade under 1950-talet (1952 var sättningen 60 cm per år). Många prognoser gjordes av den slutliga sättnings storlek där 3-20 m var ytterlighetsfall. En jämförelse med marksättningen i andra närliggande oljefält visar att sättningarna är större inom Wilmingtonfälten. Detta anses bero på följande:

- Större andel okonsoliderade eller svagt konsoliderade sediment i de oljeproducerande zonererna.
- Stort antal förkastningar som inte kan bära uppkomna spänningar utan mindre jordbävningar utlöses successivt.
- Överlagrande material utgörs av okonsoliderade sediment.

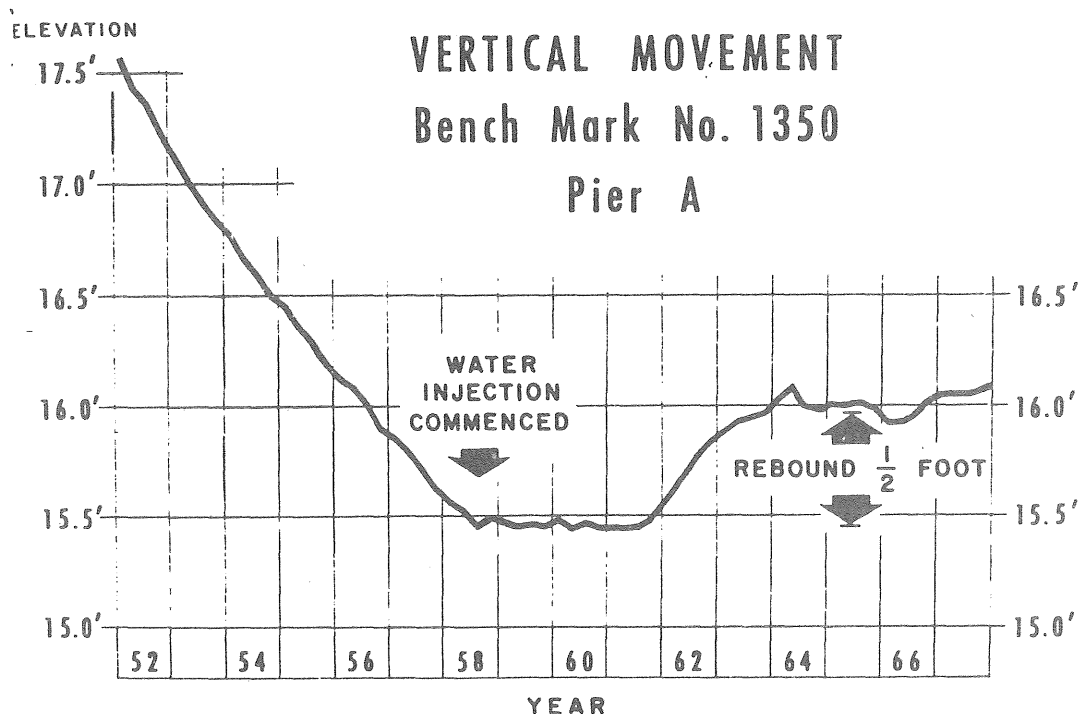
Den största marksättningen som uppmätts var nu 8,7 m ute vid ett stort skeppsvarv.

Marksättningarna har orsakat enorma problem och kostnader då de samtidigt medfört en transgression av Stilla Oceanen. Los Angeles hamn med varv och industier samt

Long Beach sjunker sakta ned i havet. Skadorna uppskattades till 100 milj US dollar före staden Los Angeles var kapabel att ingripa för att stoppa sättningarna.

Genom att injektera vatten ned i de oljeförande zonerna kan mer olja uttas, då vatten så att säga tränger undan oljan. Detta hade under 1950-talet börjat tillämpas inom flera oljefält. Los Angeles stad önskade nu att vatten skulle börja injekteras för att bl a också stoppa marksättningarna. Detta stötte på problem då oljekällorna inom fältet hade många ägare och flera av dem oroliga att oljan skulle försvinna över till grannen konkurrenten. Genom lagar och förordningar ordnades någon typ av kooperation varefter vatteninjektionen startade under 1958 med gott resultat både för oljeproducenterna och Los Angeles stad, se figur 12.

Samtidigt med registreringen av de skadliga marksättningarna stoppades vidare utvidgning av oljeborrandet inom fältet. Under 1965 gavs dock tillstånd till vidare



Figur 12. Registrerade marksättningar vid fixpunkt 1350 inom Wilningtons oljefält i Los Angeles.

borrningar men att utvinning av olja måste ske med samtidig injektion av vatten för att motverka uppkomsten av marksättningar. Denna utvidgning av borrningarna har skett mot sydöst ut mot Stilla Oceanen och längs kusten.

Under exkursionen besöktes producerande oljeborrhål och vatteninjektion på konstgjord ö utanför Los Angeles hamn. Dessutom besöktes området med maximal marksättning vid hamnen. Lunch intogs på gamla Queen Mary som nu tjänstgör som hotell och restaurang i Los Angeles hamn.

Table 5.—*Water used for public supplies, by States, 1970*  
 [Partial figures may not add to totals because of independent rounding]

State	Population served			Water withdrawn				Water delivered		Water consumed (mgd)
	Ground water (thousands)	Surface water (thousands)	All water (thousands)	Ground water (mgd)	Surface water (mgd)	All water (mgd)	Per capita (gpd)	Industrial and commercial uses (mgd)	Domestic use and losses <sup>1</sup> (mgd)	
Alabama .....	765	1,420	2,190	100	360	470	213	260	210	36
Alaska .....	62	64	126	24	35	60	473	7.0	53	11
Arizona .....	989	509	1,500	190	120	310	208	47	260	160
Arkansas .....	605	637	1,240	71	95	170	133	63	100	36
California .....	8,000	10,700	18,700	1,600	1,800	3,400	181	620	2,800	1,400
Colorado .....	306	1,670	1,980	79	310	390	197	91	300	97
Connecticut .....	590	1,900	2,490	86	270	360	143	170	190	120
Delaware .....	217	193	410	30	46	76	185	32	44	20
Florida .....	4,820	592	5,410	760	120	880	163	170	720	230
Georgia .....	825	1,350	2,170	190	350	540	250	310	240	130
Hawaii .....	662	32	694	120	12	140	197	26	110	46
Idaho .....	407	63	470	96	15	110	237	5.8	110	29
Illinois .....	3,880	6,790	10,700	720	1,500	2,200	204	570	1,600	210
Indiana .....	1,500	1,990	3,480	210	280	490	141	140	350	120
Iowa .....	1,520	505	2,030	180	73	250	123	60	190	37
Kansas .....	817	823	1,640	130	120	250	155	61	190	74
Kentucky .....	304	1,860	2,160	24	160	180	83	78	100	26
Louisiana .....	1,290	1,370	2,670	140	240	380	144	58	330	200
Maine .....	153	599	752	20	89	110	146	38	72	22
Maryland .....	368	2,750	3,120	42	380	420	136	85	340	23
Massachusetts .....	1,460	3,940	5,400	170	590	750	140	320	440	38
Michigan .....	1,360	5,500	6,870	230	920	1,200	168	640	520	95
Minnesota .....	1,500	1,250	2,750	160	180	340	125	140	210	34
Mississippi .....	1,180	213	1,390	160	30	190	134	63	120	70
Missouri .....	942	3,020	3,970	92	420	510	128	260	250	95
Montana .....	152	354	507	26	85	110	219	32	79	55
Nebraska .....	908	211	1,120	150	34	190	168	46	140	38
Nevada .....	265	176	441	81	54	130	305	39	95	46
New Hampshire .....	261	283	544	32	38	70	128	22	48	3.6
New Jersey .....	3,030	3,390	6,420	340	560	900	139	110	780	180

New Mexico .....	645	67	712	130	16	150	204	41	100	66
New York .....	4,150	12,300	16,500	460	2,200	2,600	161	790	1,900	450
North Carolina .....	660	2,020	2,680	80	380	460	170	120	340	91
North Dakota .....	189	206	395	24	26	50	126	1.6	48	28
Ohio .....	2,480	5,980	8,460	320	1,000	1,300	157	340	990	170
Oklahoma .....	551	1,450	2,000	72	190	260	130	86	170	100
Oregon .....	355	842	1,200	67	160	230	188	90	140	48
Pennsylvania .....	1,350	8,300	9,650	250	1,500	1,800	181	880	870	180
Rhode Island .....	213	634	847	18	85	100	122	62	41	5.2
South Carolina .....	221	1,010	1,230	55	240	300	242	120	180	45
South Dakota .....	284	126	410	42	18	60	145	19	41	16
Tennessee .....	1,190	1,930	3,120	160	240	400	129	140	260	43
Texas .....	4,580	4,660	9,250	690	740	1,400	155	470	970	510
Utah .....	502	444	945	150	130	280	294	25	250	130
Vermont .....	100	189	289	14	29	42	146	13	30	1.7
Virginia .....	477	3,040	3,520	74	320	390	111	160	230	42
Washington .....	1,070	1,780	2,860	290	610	910	317	470	440	160
West Virginia .....	380	794	1,170	36	140	180	150	71	110	.2
Wisconsin .....	1,540	1,570	3,110	220	270	480	155	230	250	48
Wyoming .....	130	120	250	24	25	49	197	13	37	12
District of Columbia .....	0	757	757	0	160	160	211	50	110	16
Puerto Rico .....	396	1,940	2,330	34	170	200	86	77	130	43
United States <sup>2</sup> .....	60,600	104,000	165,000	9,400	18,000	27,000	166	8,800	19,000	5,900

<sup>1</sup>Includes public use.

<sup>2</sup>Including Puerto Rico.

Table 6.—*Water for rural use, in million gallons per day, by States, 1970*

[Partial figures may not add to totals because of independent rounding]

State	Domestic use				Livestock use				Domestic and livestock uses			
	Withdrawn			Water consumed	Withdrawn			Water consumed	Withdrawn			Water consumed
	Ground water	Surface water	All water		Ground water	Surface water	All water		Ground water	Surface water	All water	
Alabama .....	63	0	63	63	13	15	27	27	76	15	90	90
Alaska .....	4.5	1.6	6.1	.2	0	.1	.1	.1	4.5	1.7	6.2	.4
Arizona .....	22	0	22	16	20	8.4	28	28	42	8.4	50	44
Arkansas .....	49	0	49	49	16	19	34	34	64	19	83	83
California .....	120	8.6	120	71	38	53	91	49	150	62	220	120
Colorado .....	9.3	1.4	11	2.1	20	15	35	31	29	16	45	33
Connecticut .....	38	.8	39	39	2.1	.4	2.5	2.5	40	1.2	42	42
Delaware .....	11	0	11	1.2	1.6	.1	1.7	1.4	13	.1	13	2.6
Florida .....	160	0	160	130	18	12	30	30	180	12	200	160
Georgia .....	72	1.3	73	8.8	31	.1	31	31	100	1.4	100	40
Hawaii .....	.1	.4	.5	.4	1.4	5.9	7.3	6.6	1.5	6.3	7.8	7.0
Idaho .....	22	2.5	24	6.1	10	12	22	19	32	14	46	25
Illinois .....	14	3.2	17	12	32	10	42	42	46	13	60	54
Indiana .....	76	11	87	61	29	17	46	46	100	28	130	110
Iowa .....	47	.1	47	19	110	25	130	130	160	25	180	150
Kansas .....	48	3.7	52	49	31	47	79	77	79	51	130	130
Kentucky .....	48	6.4	55	44	3.7	36	40	40	52	42	94	84
Louisiana .....	67	0	67	67	11	11	22	22	78	11	89	89
Maine .....	11	1.1	12	3.3	1.1	1.7	2.8	2.6	12	2.8	14	5.9
Maryland .....	46	0	46	46	10	.5	11	11	57	.5	57	57
Massachusetts .....	28	0	28	2.7	1.3	.8	2.1	2.3	30	.8	30	5.0
Michigan .....	160	0	160	26	24	6.8	31	28	180	6.8	190	54
Minnesota .....	110	0	110	110	59	9	68	68	170	9.0	170	170
Mississippi .....	25	0	25	22	16	24	39	39	40	24	64	61
Missouri .....	29	10	39	18	28	86	110	100	58	96	150	120
Montana .....	8.8	.7	9.5	9.5	17	16	33	33	26	17	43	43
Nebraska .....	22	0	22	22	80	20	100	95	100	20	120	120
Nevada .....	5.8	.2	6.0	2.3	1.6	2.8	4.4	2.4	7.4	3.0	10	4.7
New Hampshire .....	11	.2	11	1.1	.5	.8	1.3	1.3	12	1.0	13	2.4
New Jersey .....	80	0	80	40	1.5	.9	2.4	2.1	81	.9	82	42



New Mexico .....	16	.6	17	8.1	12	32	44	43	29	33	61	51
New York .....	120	0	120	12	24	13	38	34	140	13	150	45
North Carolina .....	110	1.1	110	110	43	6.3	50	39	160	7.4	160	150
North Dakota .....	17	.1	17	17	9.6	6.2	16	16	26	6.3	32	32
Ohio .....	88	22	110	100	24	16	40	39	110	38	150	140
Oklahoma .....	24	4.1	28	25	6.7	46	52	52	31	50	80	78
Oregon .....	160	14	170	170	2.6	19	22	22	160	33	190	190
Pennsylvania .....	110	0	110	11	14	14	28	18	120	14	140	29
Rhode Island .....	4.6	0	4.6	.7	.1	.1	.2	.3	4.7	.1	4.8	1.0
South Carolina .....	46	0	46	46	4.0	4.9	8.9	9.0	50	4.9	55	55
South Dakota .....	15	1.0	16	11	81	27	109	93	96	28	120	100
Tennessee .....	39	0	39	9.9	5.4	29	34	34	45	29	73	44
Texas .....	95	0	95	95	96	52	150	150	190	52	240	240
Utah .....	23	.2	23	11	34	3.2	37	19	57	3.4	60	30
Vermont .....	10	.4	11	1.1	5.6	2.7	8.3	8.4	16	3.1	19	9.5
Virginia .....	73	1.6	74	45	12	17	29	23	84	19	100	68
Washington .....	43	12	55	19	4.2	2.1	6.3	4.4	48	14	62	24
West Virginia .....	17	.6	18	.2	.9	6.0	6.9	6.0	18	6.6	25	6.2
Wisconsin .....	74	0	74	7.3	56	15	71	71	130	15	140	78
Wyoming .....	5.7	.7	6.4	5.7	3.8	15	19	18	9.5	16	25	24
District of Columbia .....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Puerto Rico .....	.4	3.2	3.6	3.0	1.3	7.5	8.8	8.0	1.7	11	12	11
United States <sup>1</sup> .....	2,500	110	2,600	1,700	1,100	790	1,900	1,700	3,600	910	4,500	3,400

<sup>1</sup>Including Puerto Rico.

Table 7.—Water used for irrigation, by States, 1970

[Partial figures may not add to totals because of independent rounding]

State	Acres irrigated (1,000 acres)	Total water withdrawn (1,000 acre-feet per year)				Water consumed <sup>1</sup> (1,000 ac-ft/yr)	Conveyance loss (1,000 ac-ft/yr)	Total water withdrawn (million gallons per day)				Water consumed <sup>1</sup> (mgd)	Conveyance loss (mgd)
		Ground water	Surface water	Re-claimed sewage	All water			Ground water	Surface water	Re-claimed sewage	All water		
Alabama .....	27	6.0	14	0	20	20	0	5.4	12	0	18	18	0
Alaska .....	2.2	.5	.5	0	1.0	.9	0	.4	.4	0	.9	.8	0
Arizona .....	1,200	4,300	2,700	0	7,000	5,000	270	3,800	2,400	0	6,300	4,500	240
Arkansas .....	1,100	1,200	260	0	1,400	1,000	100	1,100	230	0	1,300	890	90
California .....	8,700	18,000	19,000	140	37,000	23,000	5,500	16,000	17,000	120	33,000	20,000	4,900
Colorado .....	4,600	2,100	12,000	90	14,000	7,400	1,600	1,900	11,000	80	13,000	6,600	1,400
Connecticut .....	14	.7	6.2	0	6.9	6.9	0	.5	5.4	0	5.9	5.9	0
Delaware .....	17	2.6	.7	0	3.3	3.3	0	2.2	.5	0	2.7	2.7	0
Florida .....	1,700	1,400	1,100	0	2,500	1,500	160	1,300	970	0	2,200	1,300	150
Georgia .....	150	7.6	45	0	53	53	0	6.6	40	0	47	47	0
Hawaii .....	160	610	760	64	1,400	840	250	550	680	57	1,300	750	220
Idaho .....	3,700	2,300	15,000	2.8	17,000	5,200	4,800	2,100	13,000	2.5	15,000	4,700	4,300
Illinois .....	36	17	7.2	0	24	24	0	15	6.0	0	21	21	0
Indiana .....	34	20	8.9	0	29	29	0	18	7.4	0	25	25	0
Iowa .....	54	26	3.8	0	30	30	0	23	3.1	0	26	26	0
Kansas .....	1,800	3,100	230	0	3,300	2,600	48	2,800	200	0	3,000	2,300	43
Kentucky .....	25	.4	7.8	0	8.2	8.2	0	.4	6.7	0	7.1	6.8	0
Louisiana .....	670	870	880	0	1,700	1,300	480	770	780	0	1,600	1,100	430
Maine .....	22	.2	9.9	0	10	10	0	.2	8.7	0	8.9	8.8	0
Maryland .....	16	2.5	4.9	.2	7.6	7.5	0	2.1	4.3	.2	6.6	6.6	0
Massachusetts .....	34	21	44	0	65	49	0	18	40	0	58	43	0
Michigan .....	100	25	41	0	66	66	0	22	36	0	58	58	0
Minnesota .....	50	14	9.5	0	23	23	0	12	8.0	0	20	20	0
Mississippi .....	200	240	180	0	420	210	42	220	160	0	370	190	37
Missouri .....	180	79	8.2	0	87	62	6.7	70	6.9	0	77	55	5.5
Montana .....	2,200	71	8,500	.1	8,600	6,000	2,500	63	7,600	.1	7,600	5,400	2,200
Nebraska .....	4,100	3,000	2,300	0	5,300	3,900	1,400	2,700	2,100	0	4,700	3,500	1,300
Nevada .....	830	430	2,900	4.8	3,400	1,600	1,800	380	2,600	4.2	3,000	1,400	1,600
New Hampshire .....	3.3	0	3.3	0	3.3	2.5	0	0	2.8	0	2.8	2.0	0
New Jersey .....	170	63	22	0	85	78	0	56	20	0	76	70	0

New Mexico	1,100	1,500	1,700	25	3,200	1,500	170	1,300	1,500	22	2,800	1,300	160
New York	75	16	15	0	31	31	0	14	13	0	27	27	0
North Carolina	470	56	36	0	92	92	0	50	32	0	82	82	0
North Dakota	74	30	190	0	210	150	66	26	170	0	190	130	59
Ohio	32	11	25	0	35	32	0	9.0	22	0	31	28	0
Oklahoma	620	810	110	0	920	640	22	720	99	0	820	570	20
Oregon	1,900	710	4,700	3.6	5,400	2,600	1,700	630	4,200	3.1	4,800	2,300	1,500
Pennsylvania	35	.9	11	0	12	12	0	.8	9.4	0	10	10	0
Rhode Island	3.8	.5	4.7	0	5.2	3.9	0	.4	4.1	0	4.5	3.4	0
South Carolina	42	10	22	0	32	32	0	8.9	20	0	29	29	0
South Dakota	150	35	230	0	260	147	88	31	200	0	230	130	79
Tennessee	9.3	1.8	3.6	0	5.4	4.6	0	1.3	2.9	0	4.2	3.8	0
Texas	8,300	8,800	2,800	17	12,000	9,100	540	7,800	2,500	15	10,000	8,100	480
Utah	1,300	470	3,500	58	4,100	2,200	710	420	3,200	52	3,600	2,000	630
Vermont	.3	0	.1	0	.1	.1	0	0	.1	0	.1	.1	0
Virginia	80	6.1	34	0	40	38	0	5.2	30	0	35	34	0
Washington	1,400	390	5,900	0	6,300	2,500	1,200	350	5,300	0	5,600	2,200	1,000
West Virginia	2.6	0	1.6	0	1.6	1.6	0	0	1.3	0	1.3	1.3	0
Wisconsin	100	37	22	0	60	45	1.2	33	20	0	52	40	.7
Wyoming	1,700	140	5,900	8.7	6,000	2,600	1,700	130	5,200	7.7	5,400	2,300	1,500
District of Columbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Puerto Rico	91	75	82	0	160	110	47	67	73	0	140	98	42
United States <sup>2</sup>	50,000	51,000	91,000	410	140,000	82,000	25,000	45,000	81,000	370	130,000	73,000	22,000

<sup>1</sup>Excluding conveyance losses by evapotranspiration.

<sup>2</sup>Including Puerto Rico.

Table 10.—Summary of water withdrawn, except for hydroelectric power, in million gallons per day, by States, 1970

[Partial figures may not add to totals because of independent rounding]

State	Popu- lation (thou- sands)	Per capita use (gpd)	Water withdrawn (including irrigation conveyance losses)										Convey- ance losses	Fresh water con- sumed <sup>1</sup>
			Ground water			Surface water			Re- claimed sewage	All sources				
			Fresh	Saline	Fresh and saline	Fresh	Saline	Fresh and saline		Fresh	Saline	Fresh and saline		
Alabama .....	3,444	1,900	280	5.0	280	6,100	290	6,400	0	6,400	300	6,700	0	230
Alaska .....	302	830	39	0	39	210	1.0	210	0	250	1.0	250	0	16
Arizona .....	1,772	3,900	4,200	0	4,200	2,600	0	2,600	0	6,800	0	6,800	240	4,800
Arkansas .....	1,923	1,600	1,500	0	1,500	1,500	0	1,500	0	3,000	0	3,000	90	1,200
California .....	19,953	2,400	18,000	180	18,000	20,000	8,700	29,000	130	39,000	8,800	48,000	4,900	22,000
Colorado .....	2,207	6,000	2,100	7.0	2,100	11,000	9.0	11,000	80	13,000	16	13,000	1,400	6,800
Connecticut ....	3,032	1,200	150	1.0	150	1,400	2,000	3,300	0	1,500	2,000	3,500	0	180
Delaware .....	548	2,200	68	0	68	110	1,000	1,100	0	180	1,000	1,200	0	26
Florida .....	6,789	2,300	2,900	87	3,000	3,000	9,400	12,000	0	5,900	9,500	15,000	150	1,900
Georgia .....	4,590	1,200	630	0	630	4,500	140	4,700	0	5,200	140	5,300	0	420
Hawaii .....	770	3,500	910	13	920	850	860	1,700	66	1,800	870	2,700	220	810
Idaho .....	713	22,000	2,500	0	2,500	13,000	0	13,000	2.5	16,000	0	16,000	4,300	4,700
Illinois .....	11,114	1,400	1,000	40	1,100	15,000	0	15,000	0	16,000	40	16,000	0	360
Indiana .....	5,194	1,700	470	4.4	470	8,200	0	8,200	0	8,600	4.4	8,600	0	390
Iowa .....	2,825	750	500	0	500	1,600	0	1,600	0	2,100	0	2,100	0	240
Kansas .....	2,249	1,700	3,100	0	3,100	640	0	640	0	3,800	0	3,800	43	2,600
Kentucky .....	3,219	1,400	170	15	180	4,300	0	4,300	0	4,500	15	4,500	0	180
Louisiana .....	3,643	2,500	1,500	41	1,500	6,700	880	7,500	0	8,100	920	9,100	430	2,200
Maine .....	994	760	36	0	36	520	200	720	0	560	200	760	0	61
Maryland .....	3,922	1,300	140	0	140	1,300	3,500	4,900	130	1,600	3,500	5,200	0	140
Massachusetts ...	5,689	740	350	0	350	1,600	2,300	3,900	0	2,000	2,300	4,200	0	140
Michigan .....	8,875	1,500	500	400	900	12,000	0	12,000	0	13,000	400	13,000	0	330
Minnesota .....	3,805	900	780	0	780	2,700	0	2,700	0	3,400	0	3,400	0	310
Mississippi .....	2,217	950	760	0	760	810	540	1,300	0	1,600	540	2,100	37	410
Missouri .....	4,677	750	430	2	430	3,100	9	3,100	0	3,500	1.1	3,500	5.5	310
Montana .....	694	12,000	150	0	150	7,900	0	7,900	0	8,000	0	8,000	2,200	5,500
Nebraska .....	1,484	4,100	3,300	0	3,300	2,700	0	2,700	0	6,000	0	6,000	1,300	3,700
Nevada .....	489	6,700	520	6.2	530	2,700	0	2,700	4.2	3,300	6.2	3,300	1,600	1,500
New Hampshire ..	738	940	55	0	55	470	160	630	0	530	160	700	0	18
New Jersey .....	7,168	870	1,000	0	1,000	2,000	3,200	5,200	0	3,100	3,200	6,300	0	380

New Mexico . . . .	1,016	3,100	1,600	0	1,600	1,600	0	1,600	22	3,200	0	3,200	160	1,500
New York . . . . .	18,191	970	890	1.7	890	8,200	8,600	17,000	2.3	9,100	8,600	18,000	0	660
North Carolina . .	5,082	1,200	430	0	430	5,300	170	5,400	0	5,700	170	5,900	0	480
North Dakota . . .	618	1,000	82	9.6	92	550	.9	550	0	630	10	650	59	200
Ohio . . . . .	10,652	1,700	880	0	880	17,000	0	17,000	0	18,000	0	18,000	0	460
Oklahoma . . . . .	2,559	590	860	37	890	610	13	620	0	1,500	50	1,500	20	830
Oregon . . . . .	2,091	2,800	970	0	970	5,000	0	5,000	3.1	5,900	0	5,900	1,500	2,600
Pennsylvania . . . .	11,794	1,700	770	0	770	19,000	50	19,000	0	20,000	50	20,000	0	450
Rhode Island . . . .	950	490	38	.4	39	110	310	430	0	150	310	460	0	13
South Carolina . . .	2,591	1,300	170	0	170	3,100	100	3,200	0	3,300	100	3,400	0	180
South Dakota . . . .	666	910	180	170	350	250	0	250	0	440	170	600	79	250
Tennessee . . . . .	3,924	1,600	290	0	290	6,100	0	6,100	0	6,400	0	6,400	0	200
Texas . . . . .	11,197	2,400	9,200	0	9,200	10,000	7,400	18,000	21	19,000	7,400	27,000	480	9,600
Utah . . . . .	1,059	4,000	680	3.5	680	3,500	5.5	3,500	52	4,200	9.0	4,200	630	2,200
Vermont . . . . .	445	250	42	0	42	69	0	69	0	110	0	110	0	13
Virginia . . . . .	4,648	1,200	280	0	280	4,400	850	5,300	0	4,700	850	5,500	0	150
Washington . . . . .	3,409	2,100	840	0	840	6,300	37	6,300	0	7,100	37	7,200	1,000	2,500
West Virginia . . . .	1,744	3,300	80	0	80	5,700	0	5,700	0	5,800	0	5,800	0	66
Wisconsin . . . . .	4,418	1,400	490	0	490	5,800	0	5,800	0	6,300	0	6,300	.7	180
Wyoming . . . . .	332	17,000	230	21	250	5,500	0	5,500	7.7	5,700	21	5,800	1,500	2,400
District of Columbia . . . . .	757	1,700	.8	0	.8	1,300	0	1,300	0	1,300	0	1,300	0	16
Puerto Rico . . . . .	2,712	1,100	140	1.5	140	430	2,400	2,900	0	580	2,400	3,000	42	170
United States <sup>2</sup> .	205,897	1,800	68,000	1,000	69,000	250,000	53,000	300,000	520	320,000	54,000	370,000	22,000	87,000

<sup>1</sup>Excluding irrigation conveyance losses by evapotranspiration.

<sup>2</sup>Including Puerto Rico.

LAND SUBSIDENCE IN SWEDEN DUE TO WATER LEAKAGE INTO  
DEEP-LYING TUNNELS AND ITS EFFECTS ON PILE SUPPORTED  
STRUCTURES

by

Bengt B. Broms

Leif Carlsson

Anders Fredriksson

To be presented at

Second International Symposium on Land Subsidence in Anaheim, California

10 - 17 Dec., 1976.



# LAND SUBSIDENCE IN SWEDEN DUE TO WATER-LEAKAGE INTO DEEP-LYING TUNNELS AND ITS EFFECTS ON PILE SUPPORTED STRUCTURES

by Bengt B. Broms and Anders Fredriksson, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Leif Carlsson, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

## Abstract

Extensive damage on buildings and other structures have been caused in Sweden by a lowering of the groundwater level due to water-leakage into deep-lying tunnels in rock. Other factors such as deep excavations, large trees, changes of the climatic conditions have affected the groundwater level as well as the reduced recharge of water when streets, sidewalks and parking-lots are paved.

Buildings supported in timber piles have been damaged when the piles are exposed above the groundwater level and start to decay. Subsidence can increase the load in piles below a building due to negative skinfriction, since the piles will carry part of the surrounding soil. This increase of the load can be so large when the compressible strata are thick that the compressive strength of the piles is exceeded.

Batter or raked piles are frequently used in Sweden to resist lateral loads. Even a moderate subsidence can increase the maximum bending moment in the piles just below the pile cap so that the yield strength of the reinforcement is exceeded. Subsidence has also caused pile failures due to the lateral displacement of the soil under a building.

Different methods can be used to decrease or to eliminate the subsidence, e.g. preloading of the soil, pregrouting of the tunnels or injection of water.

## Underground construction in Sweden

Sweden has old traditions in mining and underground construction. Internationally Sweden is one of the leading nations with respect to the volume of excavated rock per capita. The total volume exceeded  $26 \text{ Mm}^3$  in 1974. The mines accounted for about 85% ( $23 \text{ Mm}^3$ ). Each year more than 35 km of tunnels are constructed in urban areas for traffic, service lines (water, sewage etc) and to a certain extent for storage (Jansson and Winqvist, 1976). Fig. 1 shows the tunnel-system in the region of Stockholm.

The tunnels have in many cases caused extensive subsidence due to a lowering of the groundwater. Subsidence of 20 to 40 cm are common. Especially deep-lying tunnels have caused serious problems.

## Geological conditions

About 95% of the bedrock in Sweden consists of crystalline rock, which in general is very favourable for underground constructions because of its high strength and the fact that the loose and weathered parts at the surface have been removed by the ice during the glaciation. Depressions in the rock surface are in most places indications of tectonic zones in the underlying rock which have been eroded and deepened by the land-ice.

After the latest glaciation parts of Sweden were covered with water, fig. 2. During this time clay and silt were deposited partly as products from the melting land-ice, partly from redeposited and outwashed material during the land upheaval. The clays and silts were deposited in many places over a thin layer of till or sand and gravel on the surface of the bedrock. The areas covered by clay are rather small as shown in fig. 2, but the urban regions in Sweden are to a great extent situated in these areas.



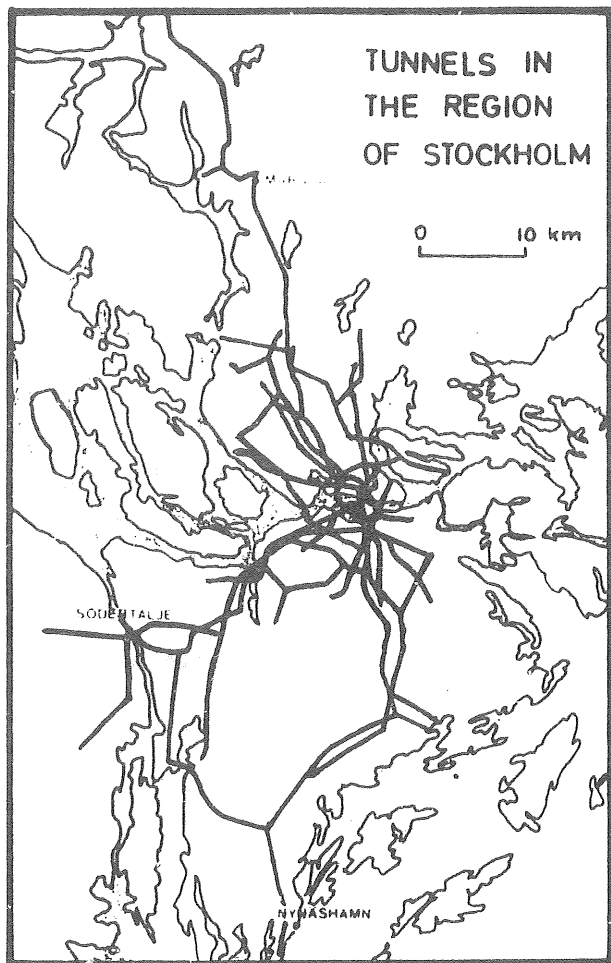


Fig. 1 (above). Map over the tunnel system in the region of Stockholm, Sweden (Morfeldt, 1976).

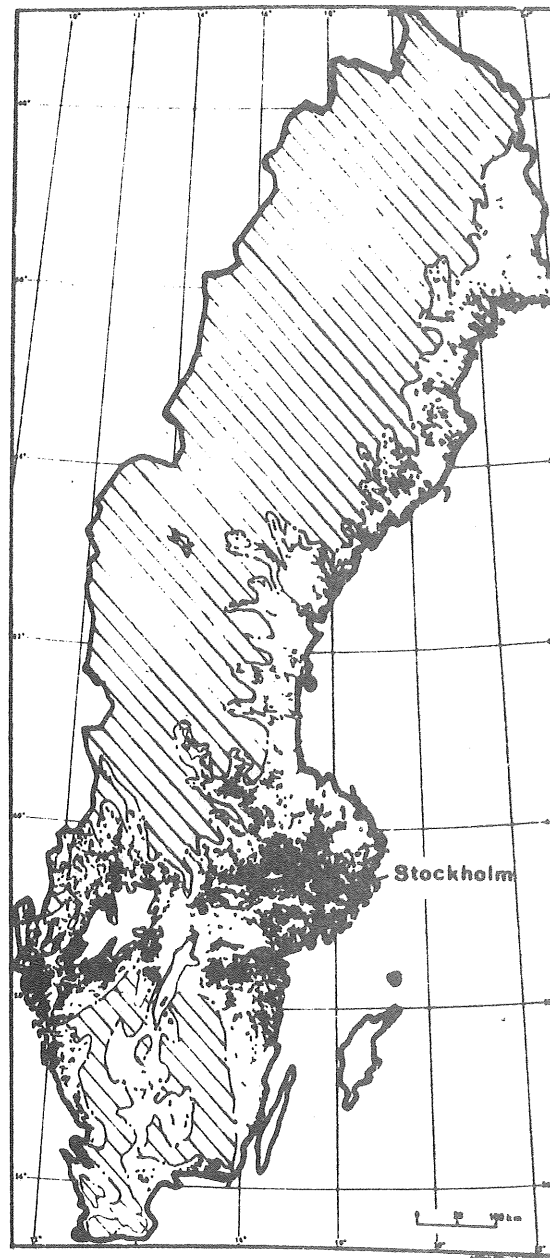
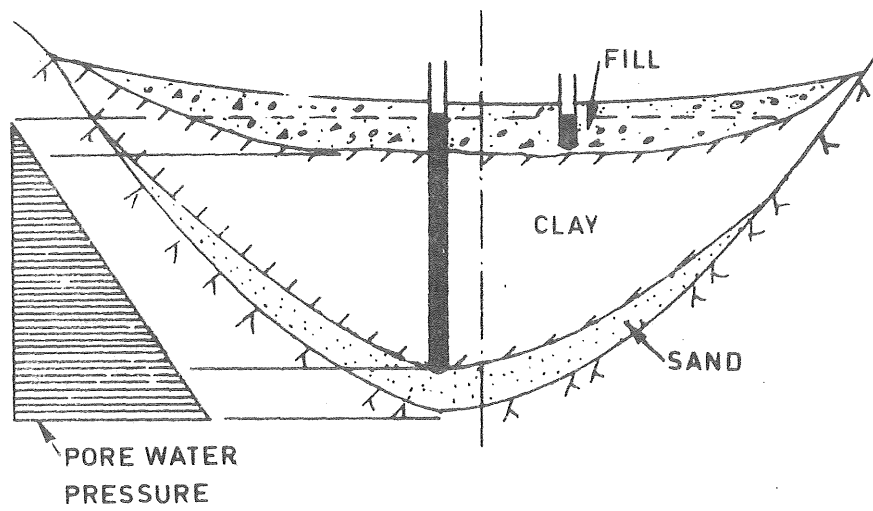


Fig. 2 (right). Areas in Sweden covered by water after the latest glaciation (with exceptions of ice-dammed lakes in the Caledonian mountains) and areas with sedimentary clay deposits.

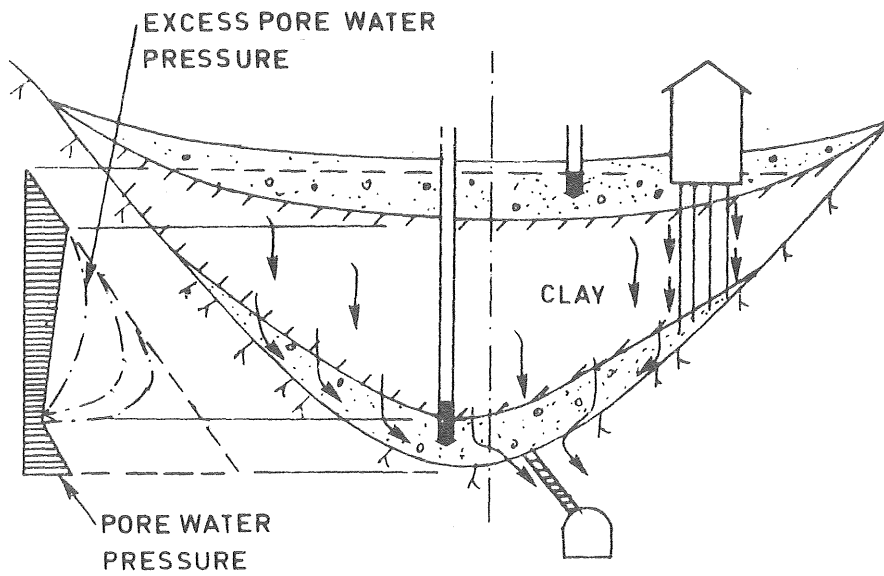
#### Hydrogeological conditions

A section through a clay-filled valley is illustrated in fig. 3. Deep-lying tunnels act as drains, particularly in tectonic zones which lower the pore water pressure first in the pervious bottom layers (confined aquifer), and then gradually in the overlying clay layer. The permeability and storage coefficient of the aquifer is usually about  $10^{-6}$  to  $10^{-5}$  m/s and  $10^{-5}$  to  $10^{-4}$ , respectively. The leakage rate varies but is in general small. However, the total volume can with time be large as well as the area affected by the lowering of the groundwater table. The size of the affected area ( $500 \text{ m}^2$  to  $1 \text{ km}^2$ ) depends on the topography and the lateral extent of pervious layers.

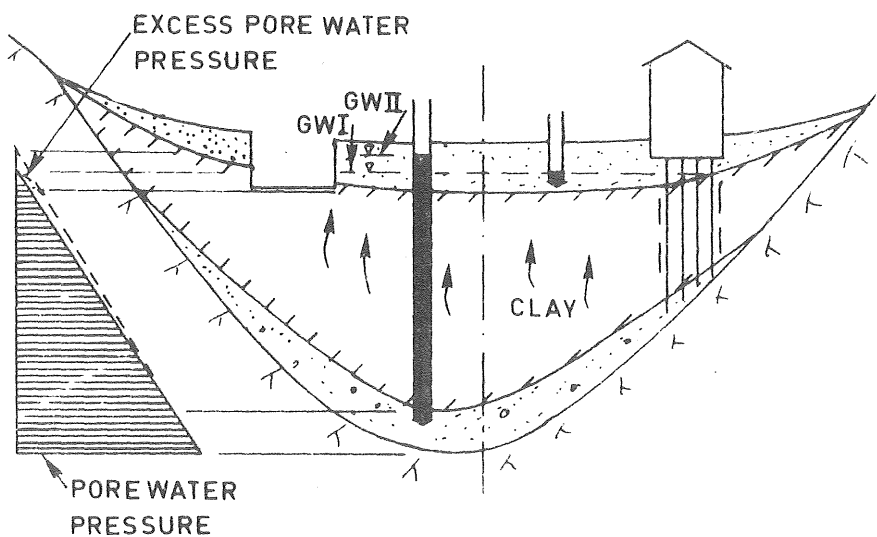
The initial pore water pressure in the soil before the construction of a deep-lying tunnel increases normally linearly with depth. The groundwater level for the surface layers is normally the same as for the pervious bottom layers as illustrated in fig. 3a.



a. Initial pore pressure distribution.



b. Pore pressure distribution after lowering of the groundwater level in the bottom layers.



c. Pore pressure distribution after lowering of the groundwater level in the surface layers.

Fig. 3. Effect of a lowering of the groundwater level on the pore pressure in a deep clay layer.

In general, this groundwater level is not affected since these layers are normally not in direct contact with the pervious bottom layers. The resulting high excess pore water pressures in the clay will gradually decrease with time as indicated in fig. 3b. Ten to thirty years may be required before the excess pore water pressures have fully dissipated, when the thickness of the clay layer is relatively large and the clay does not contain any continuous sand or silt seams.

The effective stress in the clay and the subsidences gradually increase when the pore water pressure and the water content of the clay decrease. The shaded area to the left in fig. 3b indicates the pore pressure distribution after several years when the excess pore water pressures in the clay have dissipated. The change of the pore water and of the effective pressure in the clay layer will be large. A flow rate of only a few millimeters per year in the clay from the surface layers can be expected. In fig. 3c, the groundwater level has been lowered in the surface layers, e.g. by pumping from a deep excavation. This will only have a moderate effect on the pore water pressure in the clay in comparison with a deep-lying tunnel. The subsidences will in general be relatively small. The shaded area to the left in fig. 3c indicates the pore pressure distribution after equilibrium has been reached and the excess pore water pressures in the clay have fully dissipated. A leakage from the pervious bottom layers through the clay up to the surface layers will be the result.

The effects of a lowering of the groundwater level have been studied by Torstensson (1975a) for different boundary conditions. The change of the pore water pressure with time has been calculated in fig. 4 for a 15 m thick clay layer which is located on a pervious sand layer. The groundwater level has been lowered 6 m. The indicated isochrones have been calculated for one-dimensional flow.

#### Evaluation of subsidence

The glacial and postglacial clays in Sweden are comparatively young. They are normally consolidated to slightly overconsolidated. The water content of the clays is high ( $>60\%$ ), while the shear strength is low, often less than 20 to 30 kPa. The compressibility is high and even a relatively small change of the piezometric level can cause large subsidences.

The groundwater level in Sweden can vary appreciably between different years as well as during one year, depending on hydrometeorological and geological factors.

The groundwater level in the surface layers is in general at its highest in the spring during the thawing period and reaches its lowest level early in the spring just before the thawing period. The yearly variations of the groundwater level can vary from a few centimetres to several meters. Numerous structures were damaged in Sweden during the dry summers in 1947 and 1955 because of the exceptionally low groundwater level (Hellgren, 1959). Also in 1976 the damage was extensive.

The subsidence can be calculated from the change of pore water pressure or of the piezometric head and the compressibility of the soil. Pore pressure sounding instruments have been developed as well as improved pore pressure gauges, so that the effects of a lowering of the groundwater level can be calculated (Torstensson, 1975a). Pumping and injection testing methods, which can be used to analyse the hydraulic properties of aquifers (Carlsson, 1973, Carlsson and Kozerski, 1976), and the deformation properties of deep-lying clay layers (Alte, 1976) fig. 5 have been improved. Numerical models are used to evaluate the influence of different factors and the effectiveness of various methods which can reduce or eliminate the subsidence.

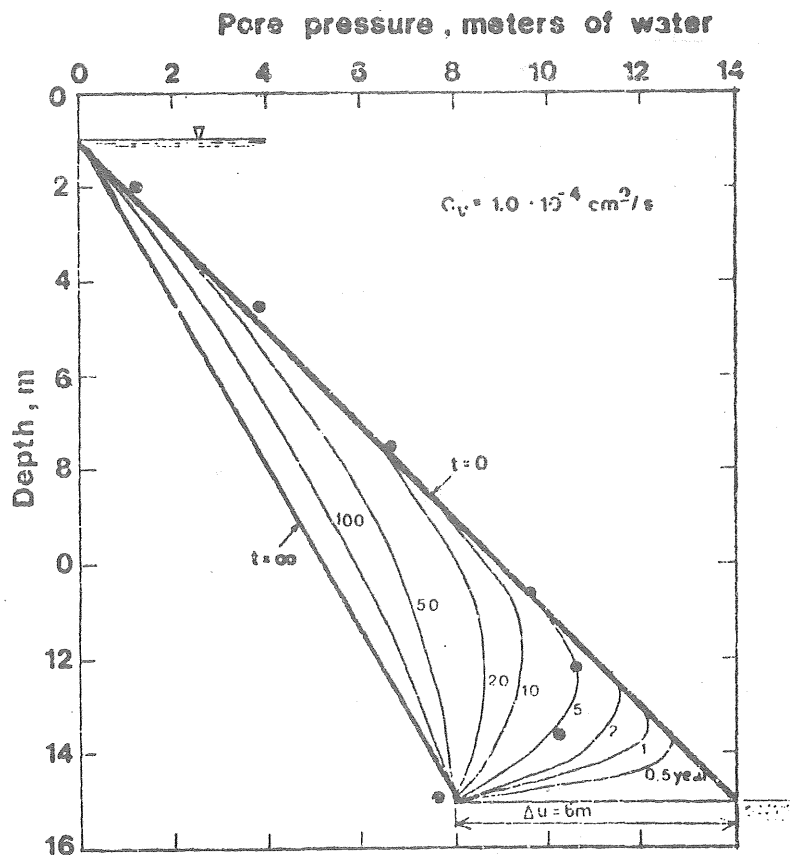


Fig. 4. Pore pressure distribution in a 15 m thick clay layer at different times after a 6 m lowering of the groundwater level.  
 • = measurement after four years (Torstensson, 1975a).

A decrease of the groundwater level has the same effect as an externally applied load. The subsidence from a 1.0 m thick fill will be about the same as that from a 2.0 m lowering of the groundwater level. Examples of subsidence calculations are shown in fig. 6 for different thicknesses of the compressible layer (Torstensson, 1975a).

The subsidence rate depends to a large extent on the permeability and the thickness of the different strata. Ten to thirty years are normally required before the consolidation has stopped, due to the low permeability of the clay ( $10^{-10}$  to  $10^{-11}$  m/s).

Continuous pervious sand or silt layers in the clay will affect the rate of the subsidence. The real subsidence rate is in general considerably higher than that calculated, mainly because of the difficulties to evaluate correctly the drainage conditions. A pervious sand or silt layer, located at the center of an impervious clay layer, will increase the subsidence rate four times and the time required to reach a given subsidence and degree of consolidation will only be 25% of the time estimated without this pervious layer at the center. It is not certain that sand or silt layers will affect the settlement rate, since it may be entirely enclosed in the clay and has no contact with the pervious bottom layers.

Overconsolidated clays are frequently fractured which will also affect the consolidation rate. The rate of subsidence in organic soils, especially peat, is often considerably lower than that estimated from oedometer tests due to creep (secondary consolidation).

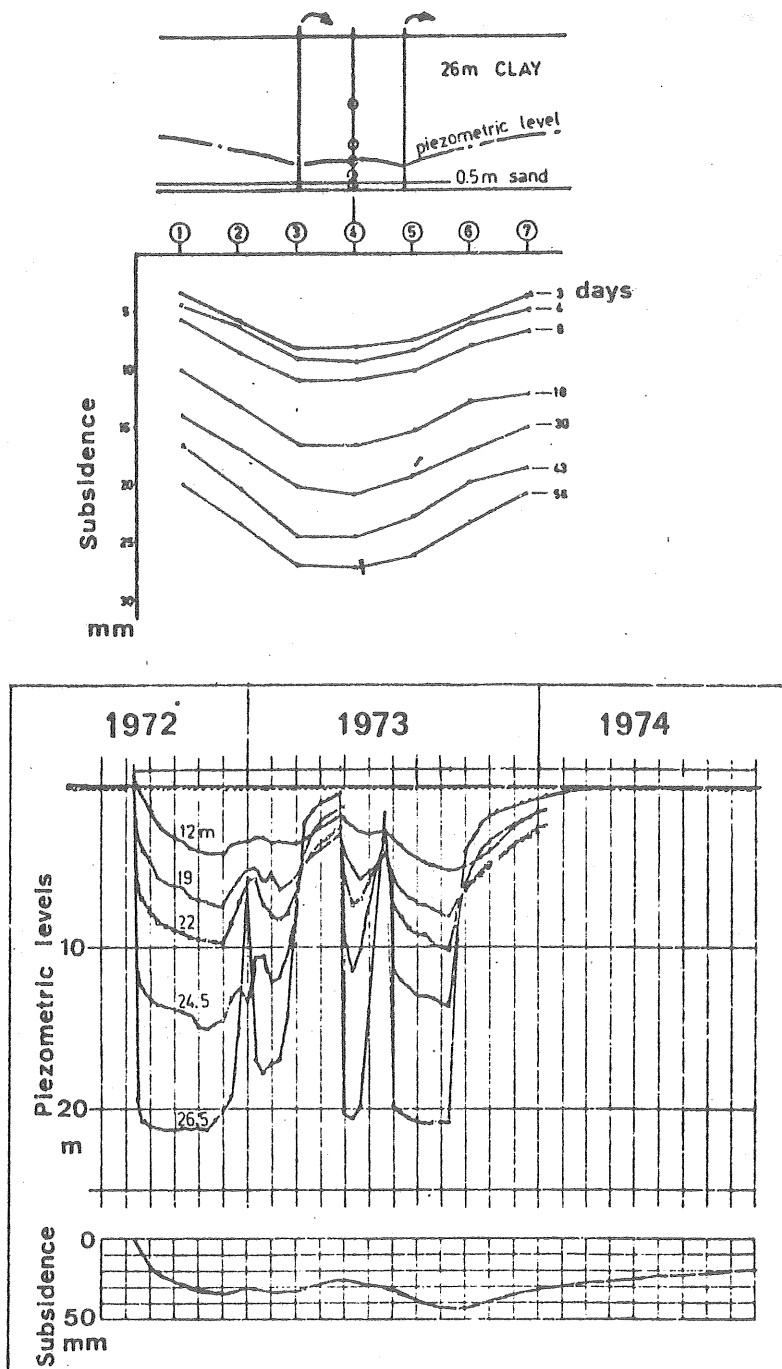


Fig. 5. Changes in piezometric levels in clay and subsidences during a pumping test in the Angered area, Gothenburg (Alte, 1976).

The groundwater level can be lowered by other factors than leakage to tunnels. The rebound after the glaciation (land upheaval) has resulted in an apparent lowering of the groundwater level which has caused problems in the Old Town ("Gamla Stan") in Stockholm. Also the reduced recharge of rain water, when streets, sidewalks and parking-lots are paved, affect the groundwater as discussed e.g. by Hellgren (1969) and Gustafson (1970). The groundwater level is also influenced by growing trees, deep excavations, drain pipes and sewer lines.

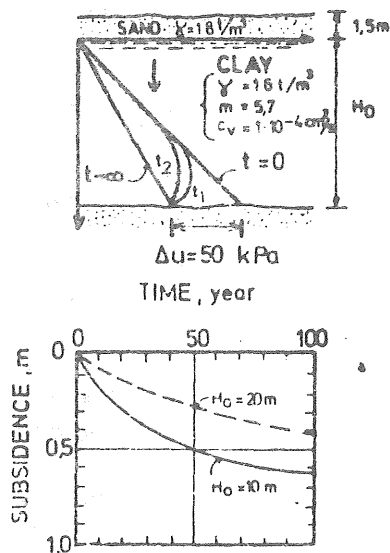


Fig. 6. Calculated subsidence versus time for different thickness of a clay-layer (Torstensson, 1975b).

#### Damage caused by subsidence

Lindskoug and Nilsson (1974) have investigated the damage from subsidence during the years 1966 to 1973 due to leakage to tunnels. Buildings are for example damaged when the differential settlement exceeds 1:200 to 1:500. Water and sewer lines rupture when the total subsidence is larger than about 15 to 30 cm (Broms, 1966, 1973). The damage caused by differential subsidences depends not only on the magnitude, but also on the rate of the subsidence and on the building material. Wooden houses as well as brick buildings, where lime has been used in the joints, can tolerate relatively large differential subsidences without damage (1:200 to 1:300). Brick structures, where cement mortar has been used can be severely damaged even by moderate differential settlements (1:300 to 1:500). Doors and windows become difficult to open and it is possible to "feel" that a floor is not level when the slope is larger than about 1:150. High rise buildings are often affected even when the differential subsidences are small, 1:500 to 1:100.

Uneven subsidence also changes the load and moment distribution in statically indeterminate structures as has been studied e.g. by Belgler (1976). The maximum bending moment in beams and columns can increase several hundred percent by differential subsidences. Even the direction of the moments can change. Timber piles and wooden grillages start to rot when they are exposed above the groundwater level. (Broms, 1973, Lindskoug and Nilsson, 1974). The bearing capacity of timber piles can be reduced already after a few months of exposure, particularly in areas where the ground temperature is high, e.g. below furnaces and where the groundwater has been polluted by sewage.

The load in the piles below a pile supported structure increases when the surrounding soil subsides (Broms, 1973). The piles will also carry part of the surrounding soil. This increase of the load in the piles, due to negative skinfriction, depends among other factors on the magnitude of the subsidence, the shear strength of the surrounding soil and on the thickness of the compressible layers. Test data indicate that the negative skinfriction for cohesive soils can be up to 20 to 25% of the effective overburden pressure. This means that the load increase due to negative skinfriction can be as large as 400 to 500 kN (40 to 50 Mp) for a 30 x 30 cm point bearing precast concrete piles driven through a 20 m clay layer, with

the groundwater level located at 2.0 m below the ground surface. The axial load in a pile can thus be more than doubled due to negative skinfriction when the length exceeds 20 to 25 m.

Measurements on two instrumented precast concrete piles, which have been driven through a 40 m deep clay layer at Bäckebol about 20 km north-east of Gothenburg, indicate that the axial load in the piles has increased by 400 kN (40Mp) after six months because of negative skinfriction. The subsidence of the surrounding soil was small (2 to 3 mm). After two years, the increase was 550 to 600 kN (55 to 60 Mp) (Fellenius and Broms 1969, and Fellenius, 1971). After eight years, when a fill was placed around the piles, the negative skinfriction had increased to 800 kN (80 Mp).

Mainly the piles at the periphery of a structure are affected by negative skinfriction. The increase of the load in the center piles of a pile group will be small, when the piles are closely spaced, since the weight of the soil enclosed by the group is distributed between several piles. When the strength of a pile is exceeded at the pile point due to negative skinfriction, the behaviour changes from that of a point bearing to a friction pile. The subsidence of the pile will be approximately the same as that of the surrounding soil. The supported structure can then be damaged by the resulting differential subsidences.

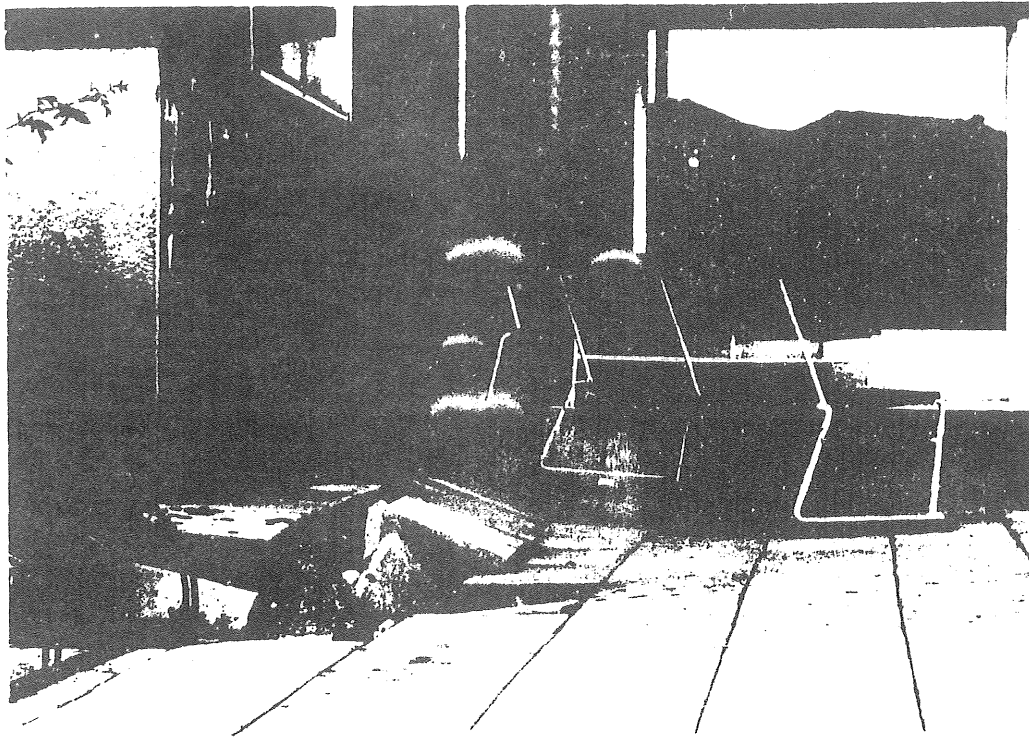
Batter piles (raked piles), which are not vertical, can be damaged and may fail when the surrounding soil settles. Such piles are frequently used below road embankments to resist the lateral earth pressures in the embankments or below buildings or other structures to resist for example wind loads. Since the lateral resistance of a pile in soft clay is low, the lateral deflection of the pile will correspond to the subsidence of the surrounding soil. The maximum bending moment in the pile can be so large that the yield strength of the reinforcement is exceeded even when the subsidence is moderate as shown by Broms and Fredriksson (1976). Batter piles should be avoided when large subsidences are expected. Any lateral loads acting on a building can be resisted, for example by a concrete skirt which extends into the soil below the building.

Extensive damage on existing structures has been observed in Stockholm and in the surrounding suburbs as illustrated in fig. 7. At the Maria Square ("Mariatorget") in Stockholm (Tyrén and Sund, 1970), the groundwater level has been lowered with about 3 m since the turn of the century. This decrease of the groundwater level has been caused by water leakage to deep-lying tunnels and by reduced recharge water.

The subsidence that has occurred at Karlaplan in Stockholm is an example of moderate leakage into a deep-lying tunnel, causing extensive lowering of the groundwater level (Morfeldt et al, 1967). There a thin layer of sand and moraine is located at the bottom of a through in the bedrock which functions as a drain for the overlying up to 30 m thick layer of clay. Many of the structures, which were built in the area at the turn of the century, have been damaged. Water and sewer lines have ruptured. It has therefore been necessary to reconstruct the streets and the side walks.

A lowering of the groundwater level of up to 5 m has been observed around the Municipal Court Building ("Rådhuset") in Stockholm (Tyrén, 1968, Sund, 1970) which has partly been caused by deep-lying tunnels. The total leakage to the tunnels is about 70 m<sup>3</sup>/day which corresponds to a theoretical subsidence of 20 cm/year from consolidation, if there is no infiltration of rain water.

Large subsidences have also been observed at Huddinge Center, located about 10 km south of Stockholm, which have been caused partly by a lowering of the groundwater level and partly by a fill which was placed over the



*Fig. 7. Damage caused by subsidence.*

area before the construction of the center. The height of the fill has gradually been increased in order to maintain the initial elevation of the ground surface. When the weight of the fill exceeds a critical value, which depends on the shear strength of the underlying soft clay, the soil and the piles below a building are laterally displaced, as illustrated in fig. 8. This occurs when the weight of the fill at foundation level exceeds  $5.5 c_u$ , where  $c_u$  is the undrained shear strength of the soft clay as determined e.g. by vane or unconfined compression tests. A lowering of the groundwater level affects the settlements, not only outside a pile supported building, but also below the building so that a void is created below the basement floor.

Damage due to the lateral displacements of the subsoil can be prevented by using light backfill material, e.g. expanded shale ("Leca") or by supporting the fill on separate piles around the perimeter of the structure. These embankment piles will also reduce the negative skinfriction on the main structural piles below the building.

#### Prevention of subsidence

The factors which affect the subsidence and methods which can be used to prevent subsidences caused by water leakage into tunnels have been studied intensively in Sweden during the last ten years as well as the legal aspects of the problem (Jansson and Winqvist, 1976).

Precautionary measures can be taken: a) before the construction of a tunnel by avoiding areas which can be affected by subsidence, b) during the construction by e.g. pregrouting, c) after the construction of a tunnel by grouting in order to reduce the leakage or by artificial infiltration of water to maintain the pore water pressure in the compressible layers.

It is often possible to decrease the subsidences in soft clays by preloading. A fill is then placed over the area and is removed when the



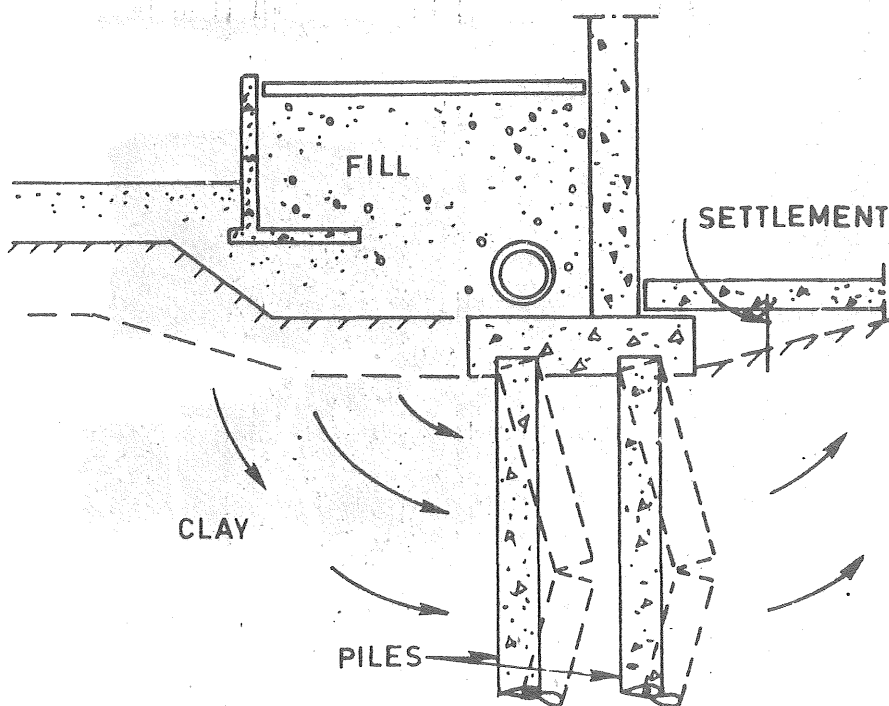


Fig. 8. Failure of piles at Huddinge Center due to lateral displacements.

subsidence have stopped which may require several years. The additional settlements from a lowering of the groundwater level will then be small as long as the increase of the load from the lowering of the groundwater level is less than the weight of the fill. Preloading can only be used where the compressible layers are relatively thin or the soil is stratified so that the subsidence occur relatively rapidly.

It is also possible to preload the compressible layers in advance by temporarily lowering the groundwater level by pumping from deep wells.

Subsidence due to a lowering of the groundwater level can also be reduced by removing part of the soil above the groundwater level. This method has been used for example in Linköping.

The leakage that can be allowed in a tunnel depends primarily on the land use within the area affected by the lowering of the groundwater level. The maximum rate is often limited to one litre per second and kilometre of tunnel. Even this low rate can be excessive in sensitive areas. Experiences with tunnels in Gothenburg indicate that pregrouting in combination with postgrouting using cement can reduce leakage to only 0.2 litre per second and kilometre (Lysén and Palmquist, 1976). Good results have also been obtained with silica, lignin and plastic grouts (Bergman et al, 1975).

Attempts have been made to inject water into the pervious bottom layers through wells where a lowering of the groundwater level has occurred (Gedda and Riise, 1976). Fig. 9 shows the effect of tunneling and water injection on the piezometric level in an area in Gothenburg. Water has also been injected through boreholes into the fissured rock beneath the pervious bottom layers from pressurized tunnels (Bergman, 1976). This method has proved very effective.

It has been possible to control the groundwater level in a one-square kilometre large area at Botkyrka, located close to Stockholm, by injecting 3 litres of water per second through a 2-inch perforated steel tube.

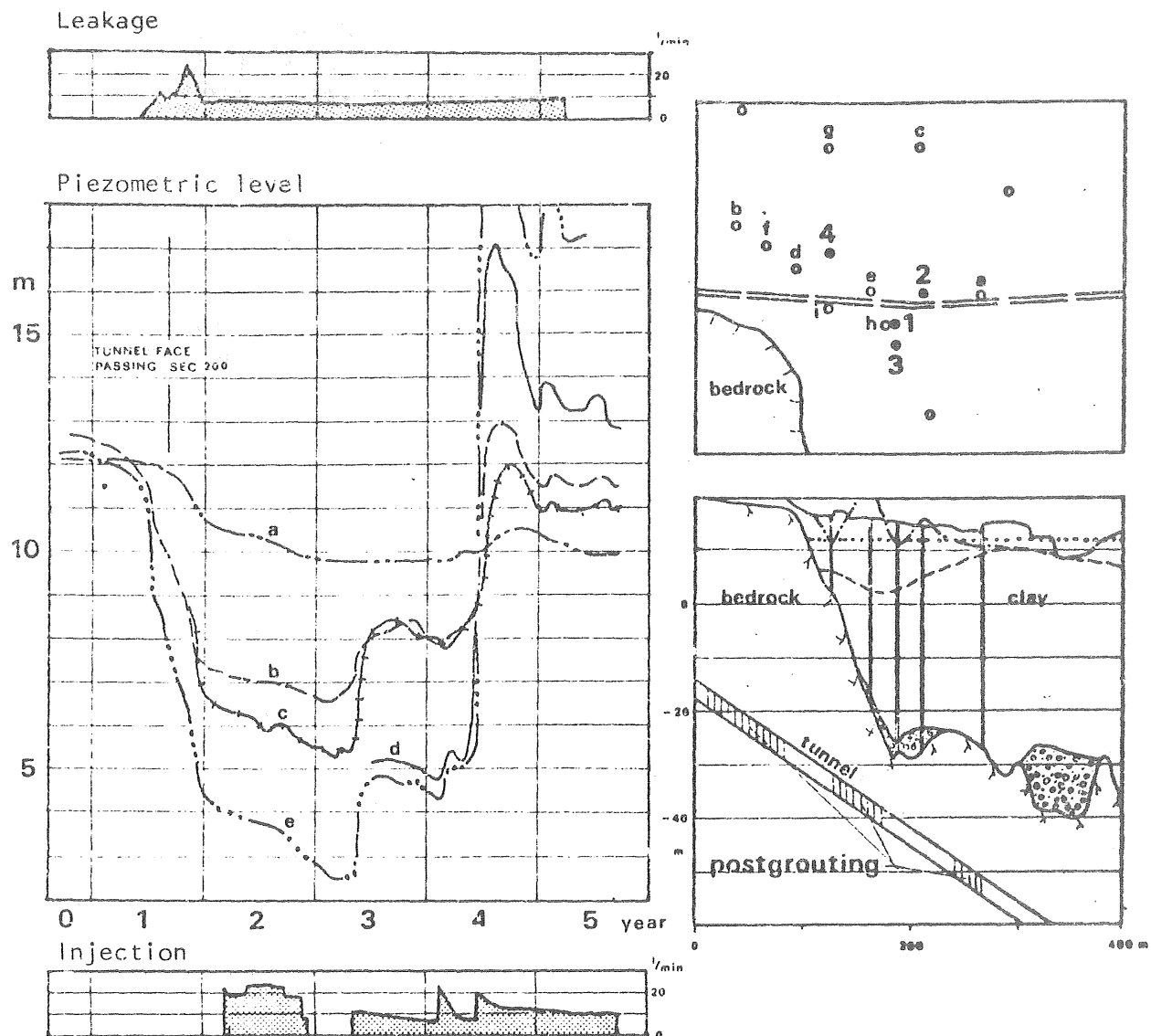


Fig. 9. Change in piezometric levels due to leakage to a tunnel and due to injection of water (Gedda and Riise, 1976).

- a. Map and section over the area (1,2,3 and 4 are injection wells).  
 groundwater level before tunneling  
 - " - before injection  
 - " - during injection.

- b. Leakage into the tunnel, piezometric levels and injection capacities.

Clogging in and around injection wells has been observed. Both the injection rate and piezometric head in the aquifer are thereby reduced.

Tunnels have also been used as injection galleries. The piezometric level in the bottom layers can hereby be closely controlled through boreholes which are connected with a water reservoir. In one area, the total costs of a tunnel, when used as an injection gallery, was approximately one tenth the estimated costs of underpinning due to the subsidence (Andréasson et al, in print).

Reference areas are required in order to evaluate whether a change of the groundwater level is caused by a change of the climatic conditions or

by a deep-lying tunnel, adjacent excavations or service lines etc. Such reference areas ("groundwater crosses") have been established close to Stockholm and Gothenburg which are representative of the virgin conditions within the regions.

For the planning of a region or a municipality it is necessary to have extensive information of the initial soil and groundwater conditions from boring and observation wells, so that the effects of a lowering of the groundwater level can be evaluated. It is essential that detailed engineering-geological and hydro-geological maps are available. A recent development in Sweden is land and foundation cost index maps, which show the relative cost in an area for different types of foundations. These maps are very useful in the different planning stages (Johansson and Lindskoug, 1971, Lindskoug and Nilsson, 1974).

## References

- Alte, B., 1976, Determination of compression properties in deep clay layer by controlled groundwater lowering. (In Swedish): Swedish Council for Building Research, Report R12:1976.
- Andréasson, L., Svensson, G., Svensson, P.-L., in print, Geohydrological activities in urban areas for environmental control: To be published at the 9th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering in Tokyo, July 1977.
- Beigler, S.-E., 1976, Soil-structure interaction under static loading, Thesis: Dept. of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 1976.
- Bergman, G., 1976, Artificial recharge into rock. (In Swedish): Byggmästaren 1976, No 3.
- Bergman, S.G.A., Lindman, K., Lundström, L., Söderman, P., Ullerud, S., 1975, Grouting of tunnels to prevent small-scale infiltration. (In Swedish): Swedish Council for Building Research, Report R25:1975.
- Broms, B.B., 1966, Damage on structures due to settlements: Byggnadskonst, Vol. 58, No 8, pp 367-375, Stockholm. (In Swedish).
- Broms, B.B., 1973, Subsidence - causes, consequences and precautionary measures: Royal Academy of Engineering Sciences, Report No 56, Stockholm. (In Swedish).
- Broms, B.B., Redriksson, A., 1976, Failure of pile-supported structures caused by settlements: Proc. 6. European Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Vol. 1. 2., pp 383-386, Vienna.
- Carlsson, L., 1973, Evaluation of the hydraulic diffusivity in aquitards. (In Swedish): Chalmers University of Technology, Dept. of Water Supply and Sewerage, Publ. B 1973:3.
- Carlsson, L., Kozerski, B., 1976, Injection of water into wells for investigation of limited aquifers: Nordic Hydrological Conference, Reykjavik 1976, p III-40 - III-51.
- Fellenius, B.H., 1971, Negative skin friction on long piles driven in clay: Proc. Swedish Geotechnical Institute, No 25, 38 pp, Stockholm.
- Fellenius, B.H., Broms, B.B., 1969, Negative skin friction for long piles driven in clay: Proc. 7. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engineering, Vol. 2, pp 93-98.
- Gedda, C., Riise, P., 1976, Deep-infiltration of water into soil. (In Swedish): Report to the Swedish Council for Building Research, 1976-04-22.
- Gustafsson, Y., 1970, Effects of the urbanization on the ground water balance: Nordisk Hydrologisk Konferens, Stockholm, Aug. 27-29 1970, Vol. 3, pp 91-99. (In Swedish).

- Hellgren, A., 1959, Damage from changes of the ground water level: Stadsbygggnad, No 5, pp 117-123, Stockholm. (In Swedish).
- Hellgren, A., 1969, Problems caused by a lowering of the ground water level: Svensk Naturvetenskap, Stockholm, pp 243-249. (In Swedish).
- Jansson, B., Winqvist, T., 1976, Plannings of subsurface use: Swedish Council for Building Research, Document S 10:1976.
- Johansson, B., Lindslog, N-E., 1971, Land and foundation cost index maps. (In Swedish): Swedish Council for Building Research, Information B12:1971.
- Lindslog, N-E., Nilsson, L-Y., 1974, Ground water and urban planning. Report from STEGA 1966-73. (In Swedish): Swedish Council for Building Research, Report R20:1974.
- Lysén, L., Palmqvist, K., 1976, Grouting of rocktunnels. (In Swedish): Swedish Council for Building Research, Report R4:1976.
- Morfeltdt, C-O., 1976, Rock-cavity and tunnels. (In Swedish): Swedish Council for Building Research, Report R15:1976.
- Morfeltdt, C-O., Nordin, P-O., Roosaar, H., 1967, Engineering geology with respect to the geological equilibrium: Byggmästaren, Vol. 46, No 6, pp 245-267, Stockholm. (In Swedish).
- Sund, B., 1970, Lowering of the ground water level at "Rådhuset" in Stockholm: Byggmästaren, Vol. 49, No 6, pp 20-22, Stockholm. (In Swedish).
- Torstensson, B-A., 1975a, Measurement of the pore pressure in the clay gives information of subsidences. (In Swedish): Byggmästaren, No 8, pp 15-19, 1975.
- Torstensson, B-A., 1975b, Pore pressure sounding instrument: ASCE Speciality Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, North Carolina, 1975.
- Tyrén, S., 1968, Problems with ground water in urban areas: Byggeforskning 68, Swedish Council for Building Research, pp 87-99. (In Swedish).
- Tyrén, S., Sund, B., 1970, Lowering of the ground water level at "Mariatorget" in Stockholm: Byggmästaren, Vol. 49, No 6, pp 17-19. (In Swedish).



Chalmers Tekniska Högskola

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjning- och avloppsteknik

Meddelande:

- nr 1       Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvatten-  
avrinning och grundvattenbildning. Läges-  
rapporter (1972-07-01 - 1973-03-01). 1973.
- nr 2       Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 1.  
Evaluering av akviferers geohydrologiska  
data med hjälp av provpumpningsdata. 1973.
- nr 3       Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 2.  
Evaluering av lågpermeabla lagers hydrauliska  
diffusivitet med hjälp av provpumpningsdata.  
1973.
- nr 4       Viktor Arnell: Nederbördsrätmätare. En samman-  
ställning av några olika mätartyper. 1973.
- nr 5       Viktor Arnell: Intensitets-varaktighetskurvor  
för häftiga regn i Göteborg under 45-årsperioden  
1926 - 1971. 1974.
- nr 6       Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvatten-  
avrinning och grundvattenbildning. Läges-  
rapporter (1973-03-01 - 1974-02-01).  
1974.
- nr 7       Olov Holmstrand, Per O Wedel: Ingenjörsgelogiska  
kartor - litteraturstudier. 1974.

- nr 8 Anders Sjöberg: Interim Report. Mathematical Models for Gradually Varied Unsteady Free Flow. Development and Discussion of Basic Equations. Preliminary Studies of Methods for Flood Routing in Storm Drains. 1974.
- nr 9 Olov Holmstrand (red.): Seminarium om ingenjörsgelogiska kartor. 1974.
- nr 10 Viktor Arnell, Börje Sjölander: Mätning av nederbördsintensiteter i Göteborgsregionen. Stationsbeskrivning. 1974.
- nr 11 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Rapport från arbetsgruppen "Dagvattnets beskaffenhet och egenskaper". Sammanställning av utförda dagvattenundersökningar i Stockholm och Göteborg 1969-1972. The character and properties of urban storm water results from investigations in Stockholm and Gothenburg 1969-1972. English summary. 1974.
- nr 12 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Interimrapport. Beräkningsmodell för simulering av dagvattenflöde inom bebyggda områden. Geohydrologiska forskningsgruppen i samarbete med VA-verket i Göteborg, meddelande nr 12, 1975.
- nr 13 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Nederbörds-avrinningsmätningar i Bergsjön, Göteborg 1973-1974. 1975.
- nr 14 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Delrapport. Dagvattnets sammansättning i Göteborg. Urban storm water quality. Interim report from a study in Gothenburg. English summary. 1975.
- nr 15 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt, Anders Sjöberg och Gilbert Svensson: Dagvatten. Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge, 1975. 1976.

- nr 16      Leif Andréasson, Leif Carlsson, Klas Cederwall,  
Bengt-Arne Torstensson och Per Wedel: Grund-  
vatten. Uppsatser presenterade vid konferens  
om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge, 1975.  
1976.
- nr 17      Olov Holmstrand: Markvattenundersökningar i ett  
urbant område. 1976.
- nr 18      -
- nr 19      Viktor Arnell, Jan Falk, Per-Arne Malmquist:  
Urban Storm Water Research in Sweden. In Eng-  
lish. 1977.
- nr 20      Viktor Arnell: Studier av amerikansk dagvatten-  
teknik. Resa i december 1976. 1977.
- nr 21      Leif Carlsson: Reserapport från studieresa i  
USA samt deltagande i 2nd International Sympo-  
sium on Land Subsidence i Anaheim, USA. 29 nov -  
17 dec 1976. 1977.
- nr 22      -
- nr 23      Viktor Arnell: Nederbördsdata vid dimensionering  
av dagvattensystem med hjälp av detaljerade be-  
räkningsmodeller. En inledande studie. 1977.